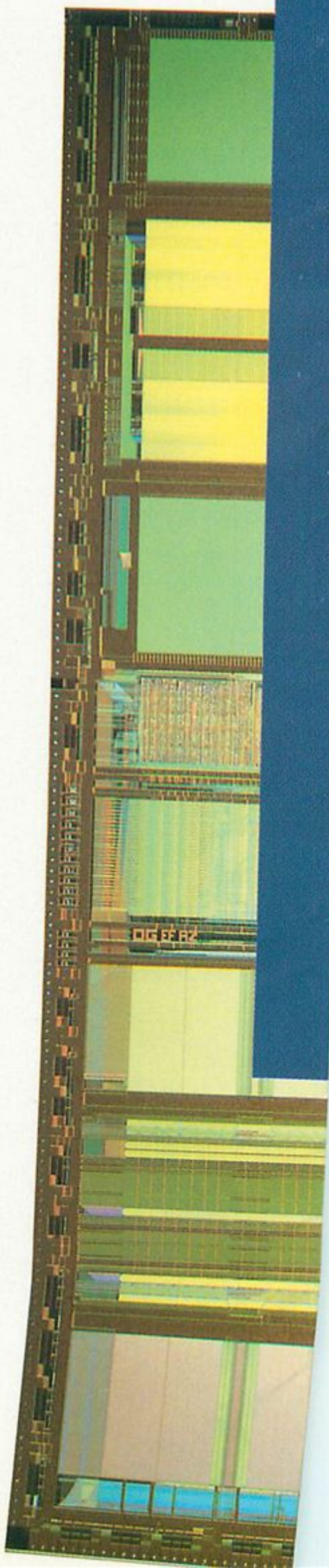
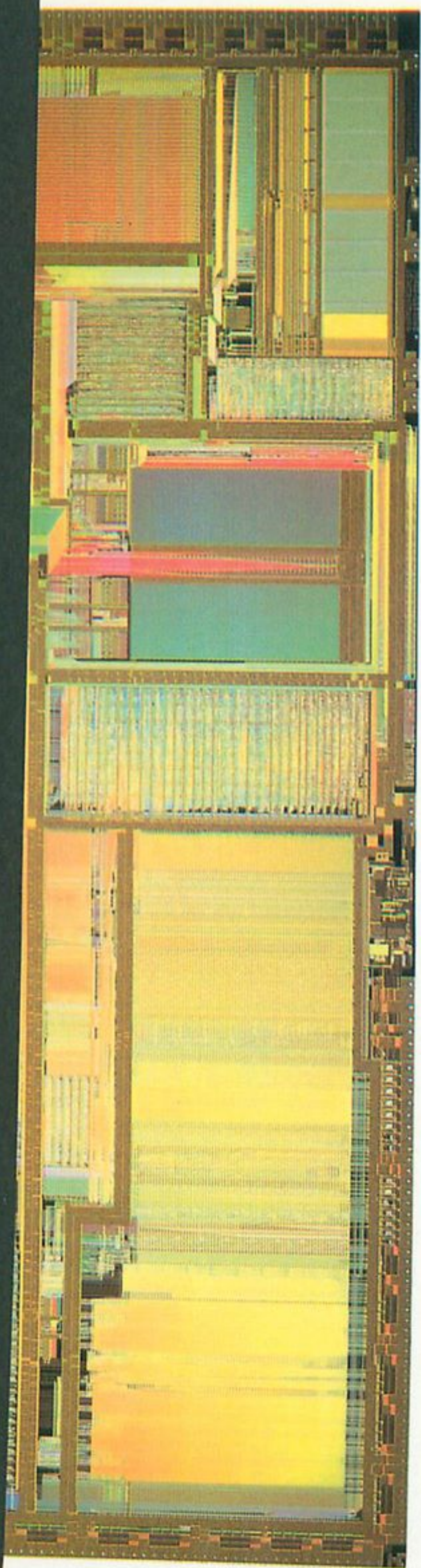
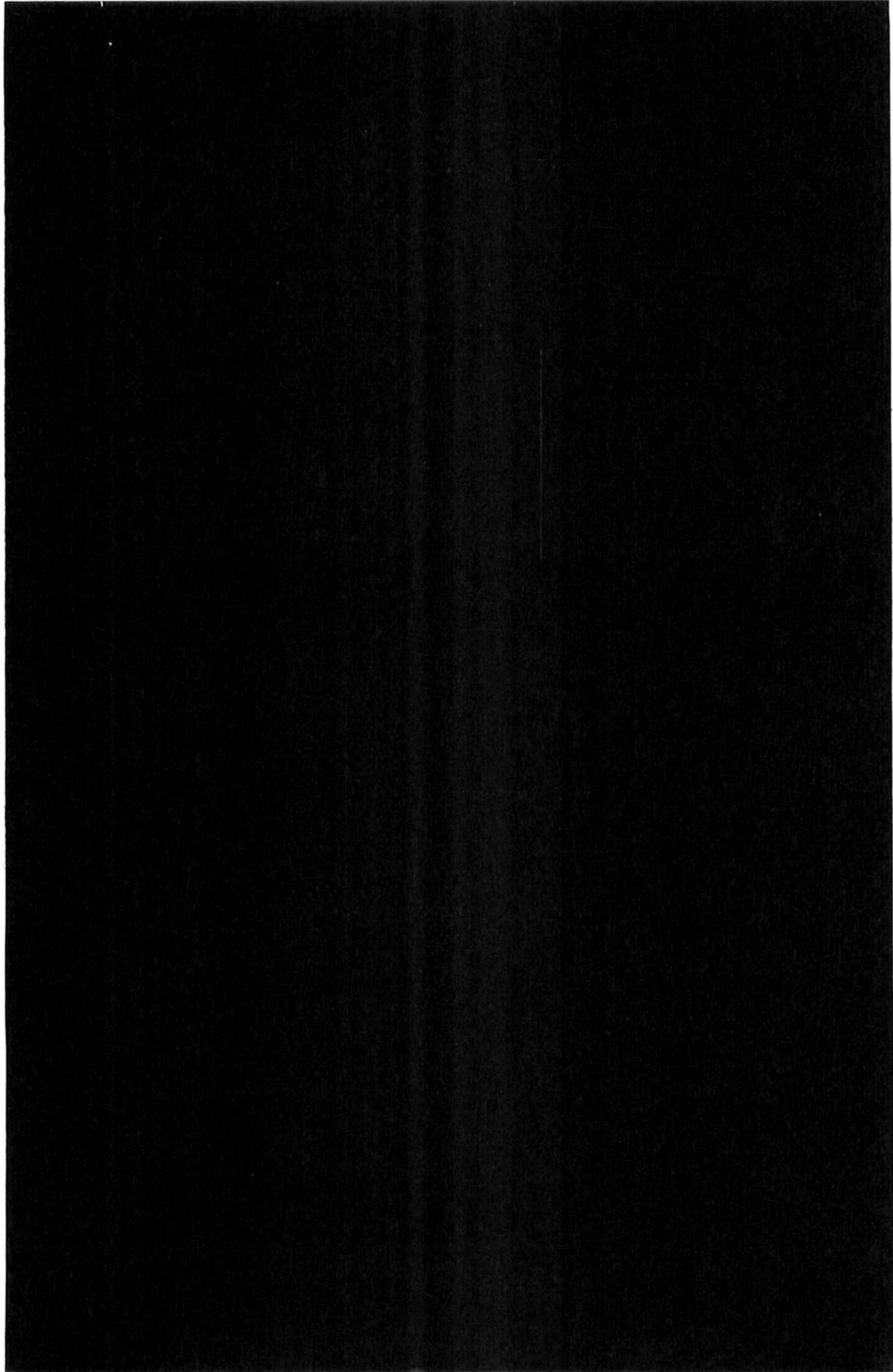
次世代マイクロプロセッサ

MPU

嶋正利著

NIKKEI INFOTECH

マルチメディア革命をもたらす驚異のチップ

日本経済新聞社

次世代マイクロプロセッサ

MPU

マルチメディア革命をもたらす驚異のチップ

嶋正利 著

NIKKEI INFOTECH

日本経済新聞社

はじめに

一九六九年八月に世界初の四ビットマイクロプロセッサ4004が発明されてから、二十五年が経過した。4004は、電子式卓上計算機にも使える一〇進コンピュータ用の汎用LSIを開発する過程で生まれた。また、J・F・ケネディが提唱したアポロ計画によるアポロ11号宇宙船が月面着陸に成功したのもこの年の七月であり、思い出に残る年であった。

「一人の人間にとってこれは小さな一歩であるが、人類にとっては大きな飛躍である」――ルイ・アームストロング船長が月面に一歩を記した時の第一声である。米国のシリコンバレーで、マイクロプロセッサの発明を目前に議論を戦わせていたのを中断して、テレビ中継を夢中になって見ていた。よく言われるように、一九六〇年代は「自由と変革を求め新しいものを捜し求める」創造的な時代であった。その「自由と変革」の大きなうねりが創造に挑戦する若き開発者達をしてマイクロプロセッサを誕生させ、さらにまだその余韻が残っている八年後にパーソナルコンピュータを誕生させた。

マイクロプロセッサが世の中にもたらした最大のものは、創造性を求める挑戦者にコンピューティングパワーを解放し、デジタルの世界を提供したことであった。

一九七七年に開発された八ビット型パソコンであるアップルIIは「オープンシステムズ」をパソコン開発の基本方針に据え、ゲームやワープロや表計算など個人向けソフトウェアの創出に挑戦する開発者に、強力なコンピューティングパワーと共に大きなビジネスチャンスを与えた。アップルIIによって切り開かれたパソコンビジネスは、一九八一年に開発されたＩＢＭのパソコンＴｈｅＰＣによって、利用者が個人からビジネス分野へと広がり、大きく飛躍した。

パソコンを通して、強力なコンピューティングパワーが編集能力や処理能力、表現能力などの個人の能力を大幅に増幅させた。続いて、人間にわかりやすいグラフィカル・ユーザー・インタフェース（ＧＵＩ）を持ったウィンドウ機能と、より高い表現力を可能にさせたマルチメディアとネットワークがパソコンに組み込まれ、個人がより高い創造性を発揮できる道具を手に入れることができた。

一九八一年に開発されたワークステーションは、低価格とハイパフォーマンス・コンピューティングパワーにより、メインフレームと言う自由を束縛していた中央集権システムから技術者を解放した。ローカル・エリア・ネットワーク（ＬＡＮ）は、高速ネットワークで結ばれた個々のコンピューティングパワーをさらに強力なシステムパワーに増幅し、より大きな仕事を可能にした。

本書では、まず、マイクロプロセッサとはどんな特徴を有し、何がマイクロプロセッサ開発

者のキーワードになっているのか、またどのようなオフィス革命をもたらしたかを述べる。次に、どんな具合にマイクロプロセッサ、パソコン、ワークステーションが発明され開発されたかを、マイクロプロセッサを開発した技術者の目から考察してみる。続いて、日米におけるマイクロプロセッサ開発力の差と、高性能実現の一手段でありワークテーションの代名詞でもあるRISC型プロセッサを考察しつつ、マイクロプロセッサの将来を予測する。

マイクロプロセッサには、一九七七年に開発されIBM互換パソコンに使われているCISC型プロセッサと、一九八七年に開発されワークステーションに使われているRISC型プロセッサがある。その十年間に飛躍的な発展を遂げた半導体プロセスとコンピュータ技術は、マイクロプロセッサの性能を驚異的に向上させただけでなく、マイクロプロセッサのCISCかRISCかといったアーキテクチャの課題にも大きな影響を及ぼした。IBM互換パソコンに大量に使われているインテル社のCISC型プロセッサであるX八六が、ソフトウェアの互換性を保ちつつどのように問題を解決し性能を向上させたかを、RISC型プロセッサの台頭、発展と対比しつつ、考察していくのも本書の一つの目的である。

また、マイクロプロセッサの横綱であるインテル社のX八六と、コンピュータの雄であるIBM社が自信をもって開発したPowerPCの現状と将来を対比させつつ、パソコンとワークステーションを成功に導いたオープンシステムの未来を予測する。

第二次大戦以後に日本が強力に押し進めた高度技術大量生産という文明は、高度成長をもたらしたが、いま、その文明の創造と発展にかげりが出てきた。一方、米国はパソコンという文明の上に、マイクロプロセッサ、オペレーティングシステム、アプリケーションソフトウェア、マルチメディアなどの文化を創造し発展させてきた。その違いについても考察している。

最後に、十年前にブームになったニューメディアが成功せずに、マルチメディアがなぜ成功するのかを考察しつつ、マイクロプロセッサの発展がもたらすマルチメディア機器の未来と、それに伴う社会の変化を考える。

この本は、マイクロプロセッサに興味を持たれている人に書いているので、一種のデータベースとして、マルチメディアの本質でもあるが、必要なところを必要な時に、利用していただければ幸いです。

マイクロプロセッサは人類に与えられた「知への道具」である。一九九〇年代後半は道具を完成する時期であり、二十一世紀はこの道具を使いこなして花を咲かせる時代となる。

本書の執筆に当たり、取材と編集等でお世話になった日本経済新聞社出版局電子出版部の皆さんに感謝します。

一九九五年一月

嶋　正利

次世代マイクロプロセッサ◉目次

カバー写真／ペンティアム（提供：インテルジャパン）
装幀／本文レイアウト　岡孝治（戸田事務所）

第1章

マイクロ
プロセッサとは

第1節

マイクロプロセッサの発明

電子計算機との出会い

私が計算機と言う名を初めて知ったのは、一九六六年、今から二十八年前の大学四年生のときだった。大学では、理学部化学科の有機化学講座に入講し、卒業研究は檜の成分であるヒノキチオールの反応速度を研究することに決まった。反応速度の研究では計算を頻繁に使うので、計算機が必要だった。階段の二階と三階の間に計算機室という洞穴のような狭く長細い部屋があり、米国モンロー社製の機械式電動計算器があった。加減乗除算の四則演算ができたが、モーターで歯車を駆動した機械式の計算器だから、物凄い音でとても部屋には居られなかった。計算機室が実験室から隔離されている理由が良くわかった。

次に、電子計算機とIBMという名を聞いた。それまで、有機化合物の構造決定には核磁気共鳴などを使っていた。だが、X線と電子計算機を使った新しい方法が発明され、同室の修士の人が東大に習いに行って、初めて世の中に凄く早く計算できる電子で動く計算機があることを知った。私は反応速度の研究をしていたから、スケジュールを逆算して立てることを習得した。というのも、実験の最後の段階が資料のサンプリングの最も忙しいときで、真夜中にでも

なったらとんでもないことになるからである。もっとも、それは失敗してからはじめて気が付いたことであった。

大学を卒業する頃は、化学工業界の不況を反映して、今と同じように就職難だった。私は同じ化学教室の教授の友達が経営するビジコン社に入社した。そこで、三菱の電子計算機の科学分野プログラマーになる予定だった。ところが、プログラムをアセンブラやコボルで組むことは論理を組み立てることと同じで興味もあり面白いのだが、訓練中に行う実務が全て経理関係であり、五カ月辛抱したが、とても耐えられなかった。無理を聞いてもらって大阪にあるビジコンの電卓の開発・製造を担当していた日本計算器に出向させてもらった。

当時、ビジコンでは機械式の歯車を使った手回し計算器も製造・販売していた。手回し計算器には二つのレジスタ（記憶装置）があり、一つは数字の入力レジスタで、もう一つは加算した結果を格納しておくアキュムレータ（累算器）というレジスタであった。入力レジスタには歯車に直結したツメ

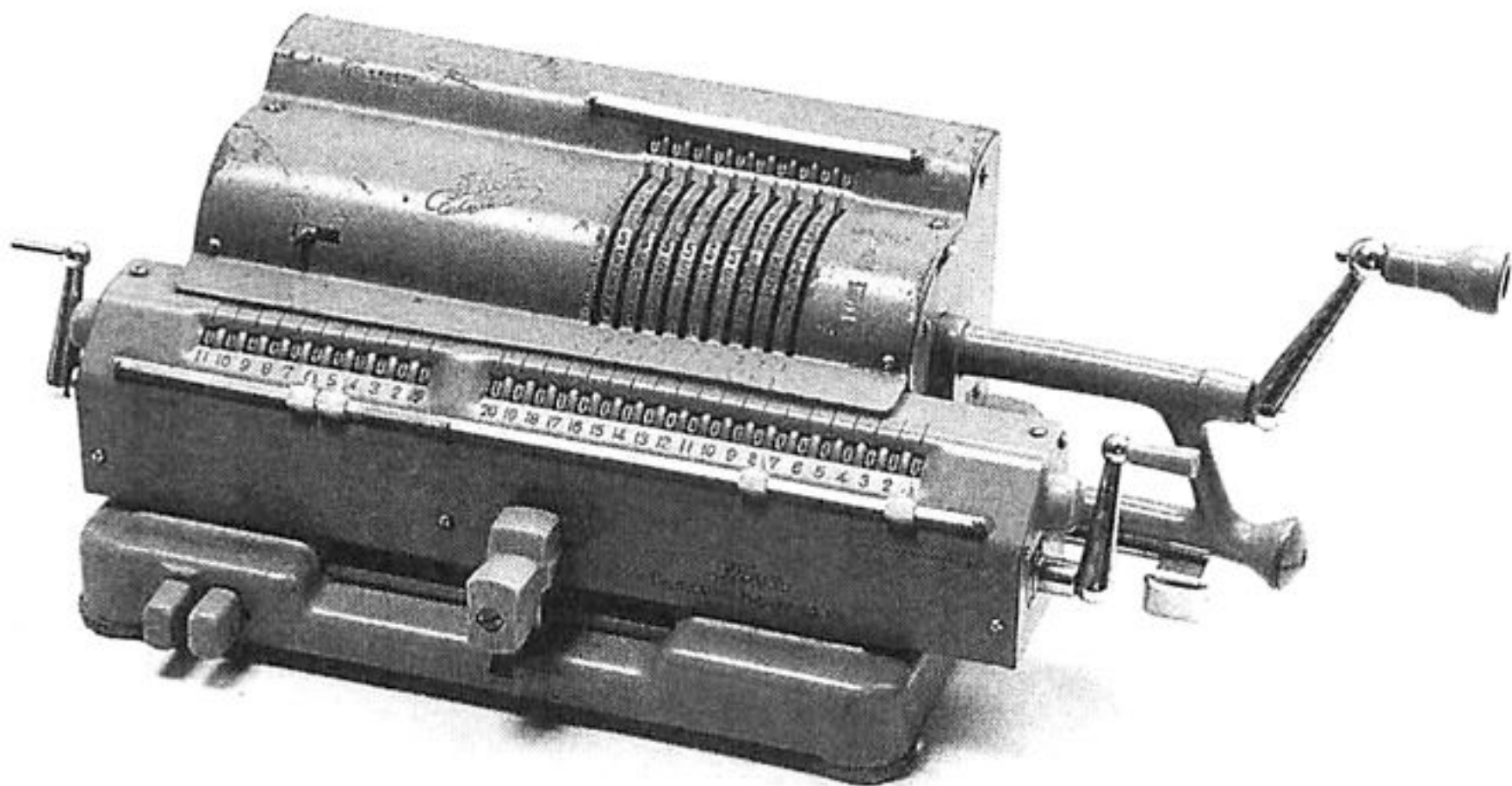



写真１　昭和30年代の手回し計算器（提供：文具資料館）

を回して〇から九までの数字を入力できる機構が付いていて、入力の桁数分用意されていた。十六桁あれば立派な科学計算器であった。

加算をするためには、まず、アキュムレータをクリアする。そして、最初の数字を入力レジスタにセットする。次に、計算器の脇に付いているハンドルを時計回りに一回転させて入力レジスタの内容をアキュムレータに足し込み加算する。以下同様に新たな数字を入力レジスタにセットしハンドルを時計回りに回してアキュムレータに足し込んでいく。減算はハンドルを時計と逆回りに回せば入力レジスタの内容をアキュレータから引いていく。乗算も除算も、算数で紙と鉛筆を使って計算するのと同じようにやればできる。乗算は、まず、アキュムレータをクリアし、被乗数を入力レジスタにセットする。次に、乗数の一番下桁の乗数が三であればハンドルを三回時計回りに回してアキュムレータに足し込んでいき乗算する。桁を上げるにはアキュムレータのレジスタを機械式に一桁分だけ右にシフト(ずらす)すればできる。次の桁の乗算も同様にして実行する。平方根の計算も算数でやるのと同じようにやればできる。

電卓や電子計算機やマイクロプロセッサにも、アキュムレータやレジスタがあり、それらの加算・減算やシフトやクリア機能が電卓や電子計算機やマイクロプロセッサの基本となっている。あとは、論理を組め込めば目的とする計算機ができあがる。

大学では電子工学も電子計算機も習っていなかったので、どんな本で勉強すれば良いのか全

くわからず、電子計算機のことがいろいろ書いてある『ディジタル電子計算機』（高橋茂）と中身が読んで難しそうな『論理数学とディィジタル回路　オートマトン入門』（宇田川銈久）という本を二冊買って、電卓の開発部門へ移った。幸運なことに、その二冊の本が、電卓ばかりでなくマイクロプロセッサ開発時の大きな助けとなった。それらの本には随分と書き込みがあるので、大分勉強をしたらしい。

いろいろなマイクロプロセッサ

電子計算機には〇から九までの数字を取り扱う事務用の一〇進用電子計算機と、『〇』と『一』のデータを扱う二進用汎用電子計算機がある。電卓は、電子式卓上計算器の略語で、一〇進用電子計算機を極端に簡単化した電子式計算器であり、電卓を大規模集積回路ＬＳＩで開発したときに誕生したのが世界初のマイクロプロセッサ４００４である。

マイクロプロセッサは、使用される応用分野によって、ＤＯＳ／ＶパソコンといわれているＩＢＭ社のパソコンＰＣ／

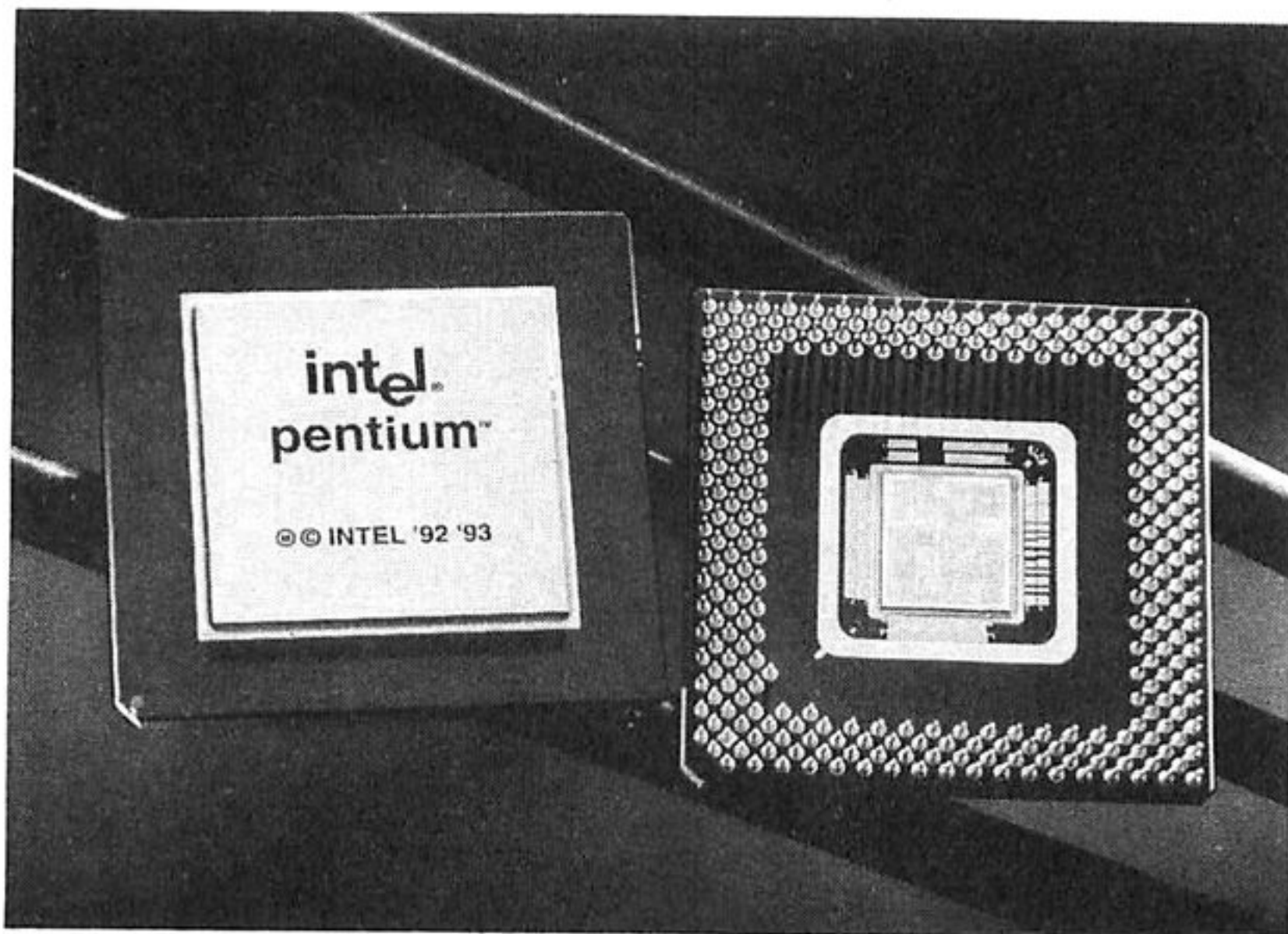



写真２　インテルのペンティアムプロセッサ（提供：インテルジャパン（株））

ATやアップル社のマッキントッシュなどのパーソナルコンピュータに使われているインテルのX86（486やペンティアム）やモトローラの680X0で代表されるCISC型プロセッサ、コンピュータのダウンサイズに大きな影響をもたらしたワークステーションに使われているRISC型プロセッサ、マルチメディアなどの音源ボードにも使われているデジタル信号処理プロセッサDSP、ペン・ベース・パソコンなどの携帯情報端末機に使われているマイクロプロセッサ、そして、システムの全ての機能を一つのチップに集積して家電製品などに使われているマイクロコンピュータ（以下ワンチップマイコン）、などに大別される。

応用分野からの特異で過酷な要求は発明の母であった

一片の半導体チップ上にコンピュータを構築するというコンピュータ・オン・チップ（Computer on a chip）の予想は一九六三年頃に立てられた。しかし、予想したが誰も挑戦しなかった。挑戦しなかったのは具体的なアプリケーションが想像できなかったことや、半導体プロセスが未熟だったこと、さらに改良という技術または他の方法を使うことで明日の問題に対処できたこと、そして応用分野からの執拗な要求がなかったからであった。

集積回路（IC）への道を開くことになったシリコンプレーナ集積回路は、ノイス博士によって一九六一年に発明された。ノイス博士は米国の半導体会社の祖ともなるフェアチャイルド社を設立し繁栄させ、今日のシリコンバレー王国の基礎を築いた人物である。

一九七〇年頃のミニコンピュータのメモリには電源を切ってもデータを保持できる不揮発性メモリである磁気コアメモリが使われていた。四キロバイトのメモリボードの大きさはA3サイズ位で値段は二百万円もした。磁気コアメモリは、データの読み書きに時間がかかり、しかも大きさの縮小化も限界に近づきつつあった。この特異な過酷な問題を解決するために、フェアチャイルド社で副社長をしていたノイス博士は、新たにインテル社を設立し、より大規模な集積回路（LSI）が期待できるシリコンゲートMOS技術を開発しつつ、今日、産業のコメとなったDRAM（ダイナミック・ランダ

応用		新製品
低コスト・大容量データ・ストレージ	→	半導体メモリ コア・メモリ→DRAM
	→	フロッピーディスク
	→	ハードディスク
	→	光ディスク
	→	フラッシュメモリ → シリコンディスク ↑
プログラマブル・メモリ	→	PROM：DRAMの信頼性向上研究の結果
電子式卓上計算器	→	4ビット　マイクロプロセッサ
インテリジェント　ターミナルと パーソナル　コンピューティング機器 （パソコン）	→	8ビット　マイクロプロセッサ、 OS（DOS）、 BIOS
ワークステーション	→	32ビット　マイクロプロセッサ
	→	LAN：ローカル・エリア・ネットワーク
	→	GUI：グラフィカル・ユーザー・インタフェース
	→	RISC プロセッサ コンパイラ技術、パイプライン技術
高速演算	→	浮動小数点演算用チップ
高性能信号処理	→	DSP（デジタル・シグナル・プロセッサ）
高性能図形処理	→	イメージ　プロセッサ 画像用メモリ
高性能システム	→	スーパースカラ技術　；並列処理
	→	スーパーパイプライン技術　；高動作周波数
	→	VLIW 命令アーキテクチャ　；超並列処理 ＋ 超高動作周波数
	→	高速 DRAM RDRAM シンクロナス DRAM キャッシュ付 DRAM

図1－1　応用からの要求は発明の母であった

ム・アクセス・メモリ）を発明した。

DRAMとは、データ情報を電荷として、半導体によるコンデンサで作ったメモリセル中に一定時間保持するタイプの記憶用部品である。そのためメモリセルの信頼性が非常に大きな問題となった。この問題を解決するために、電荷がどのように保持されるのかという物性を研究する必要があった。この研究を通して、今日のフラッシュメモリ（ノートパソコンや電子手帳のメモリカードに使用）につながるPROM（プログラマブルな読み出し専用メモリ。パソコンに必ず一つはBIOSプログラムを格納するために使われている）が発明された。

続いてパソコンにとってもう一つの重要な発明がなされた。一九七二年、IBM社はフロッピーディスクの開発に成功した。それまでデータやプログラムのコンピュータへの入力は穿孔カードが主流であった。一枚のカード（縦八・三㎝、横十八・七㎝、厚さ〇・一八㎜、重さ約二・五g）に八十文字入力できた。データの追加や訂正などがカード単位ごとに行える便利さがあったが、カードパンチ機とカード読み取り機の値段は高く、場所を取り、騒音が激しく、キーパンチャーの腱鞘炎の問題や、カードの保管のための湿度の管理など多くの問題を抱えていた。また三千行のプログラムやデータを作ると、重さが約七・五㎏、高さが約六十㎝になってしまう。これらの問題を解消するために、フロッピーディスクがIBMによって開発されたのである。二十㎝（八インチ）角のキャディ内に、表面に磁性体を施したマイラ板を挿入した

磁気ディスクで、七十七トラックからなり、三千枚のカードに相当する二四五キロバイトの記憶容量があり、重さはわずか五十六グラムであった。

このように、アプリケーションにおいて特異で過酷な要求があり、改良という技術では将来の問題を解決できない場合に大きな発明がなされている。「初めに応用ありき、応用が全てである」と言っても過言ではないだろう。応用に大きな問題が生じるほどそこにはキラキラと輝く宝石の原石が埋まれていると思って研究・開発することが成功への近道である。四ビットと八ビットのマイクロプロセッサやＲＩＳＣプロセッサが発明されたきっかけとして、どのような特異で過酷な要求がアプリケーションにあったのかは第二章で解説する。

ハードウェアをソフトウェアで置き換える

世界初のマイクロプロセッサ４００４が発明されて今日までの二十五年の間に多種多様のマイクロプロセッサが出現しており、約百種類以上の異なったアーキテクチャが開発された。アーキテクチャとはアイデアであり、アイデアとは思想であり個性のほとばしりでもある。いわば、百以上の主張があったと言える。新しいアーキテクチャは必ず新しい応用分野からの特異な要求を解決しようとして誕生している。すなわち、「初めに応用ありき、応用が全てである」。

一九六九年に発明された世界初の四ビット・マイクロプロセッサ４００４は、電卓などの一○進コンピュータとして一○進データの演算を可能にしただけではない。高コストでしかも複

雑で柔軟性に欠けたハードワイヤード（配線論理）というハードウェアで構築していた論理回路を、安価でかつ柔軟性があるソフトウェアで置き換えることを可能にさせた。この「ハードウェアをソフトウェアで置き換える」という発想は、制御機器や事務機などのシステムの論理設計者に、革命的な論理設計手段と共に強烈な衝撃を与えた。

さらに、マイクロプロセッサによるコンピューティングパワーは家電製品や比較的低速度の事務機器や各種の制御機器に応用され、今日のワンチップマイコンの基礎を築いた。４００４を使ったプリンタ付き電卓では加減算時に総合計が取れると同時に小計も取れるようにしたり、プリント中でも最大八ストロークのキーボード入力を可能にさせたり、平方根計算をオプション機能にしたり、といったことがプログラムで簡単に実現できた。このように、マイクロプロセッサの導入により、システム開発技術者は、システムのハードウェアをいかに作るかという作業から、どのようなシステムをどのような付加価値を付けて開発するかに、より多くの時間を使えるようになった。

コンピューティングパワーの解放

一九六〇年代のコンピュータ業界はメインフレームの時代であった。低価格のミニコンピュータも登場したが、価格が一九七〇年でも一万ドル（三六〇円／ドル）以上であった。その一万ドルで買えたのは、わずか一六ビットのプロセッサと四Ｋバイトのメモリと超低速度（十文字／秒）のタイプライタに紙

テープパンチャーとリーダーが付いたテレタイプ入出力装置だけであった。
また、メインフレームにはキーボードと表示の機能しかない自分では何もできないダンプ・ターミナル（端末機）がつながっており、キーボードで一文字入力するとその情報がコンピュータに送られ、コンピュータがキーボードから送られた入力データの全てを処理していた。文章の入力だけでなく編集も全てコンピュータが行っていた。コンピュータが非常に高いうえに、通信回線を介したTSS（タイム・シェアリング・サービス）を利用すると文章の入力や編集だけでも膨大なコネクティングチャージ（接続料）を請求された。
一九七七年に開発された八ビット型パソコンであるアップル社のアップルIIは「オープンシステムズ」をパソコン開発の基本に置いた。サードパーティー（第三者）が開発するプリンタやミュージックシンセサイザなどが拡張ボードを使って簡単に接続されるように、拡張システム・バス・インタフェースと入出力制御プログラム（BIOS）を拡張ボード開発者に開放した。オープンシステムズの採用により広範囲の市場を創出する可能性が予想され、アップルIIはゲームやビジネス向けアプリケーション開発者に創造性と新ビジネスに挑戦する大きな機会を与えた。表計算用ソフトであるビジカルクやワープロ用ソフトが開発され、徐々にマイクロプロセッサが提供するコンピューティングパワーが個人に解放されるようになった。さらに、一九八一年にIBMが「オープンアーキテクチャ」を基本方針に置いた一六ビット型パソコン

ＴｈｅＰＣを市場に登場させ、パソコンの利用者はビジネス分野に急速に広がった。

ワークステーションの出現

一九七〇年代後半になると半導体、システム、建築、航空機などの設計にＣＡＤ（コンピュータによる設計）が広く使われるようになった。メインフレームに比べると高性能ミニコンは小型で性能も決して悪くなく安価であった。安価といっても二十万ドル（一ドル三六〇円）ほどの価格であった。ＣＡＤを必要とする設計者は一六ビット型ミニコンにグラフィックス用端末機を接続して作業し、必要であれば、高速ローカル・エリア・ネットワーク（ＬＡＮ）でそれぞれを結び、システム全体の処理能力を高めることができた。欠点は、コストパフォーマンスの悪さと、端末機とミニコン間の遅いデータ転送と、設計者の机上でのデータ保存が不可能であったことである。当時のミニコンはまだコンピュータ室に設置されていた。

一九八一年にアポロ社はエンジニアリングワークステーションの開発に成功した。ミニコンとほぼ同じ性能で価格は六万ドルであった。ミニコンのコンピューティングパワーとネットワーク機能にパソコンの使い易さがひとつにまとめられ、強力なコンピューティングパワーを持ったワークステーションが技術者の机上に設置されたのである。ところが間もなく問題が表面化した。問題は、ソフトウェア開発者には高価すぎることと、アポロ社が標準化せずに自社開発のＯＳとＬＡＮを採用したためにサードパーティーが開発するアプリケーションソフトの数

が予想通りに出現しなかったことと、他のシステムへの接続が難しかったことなどである。
アポロ社の動きを見ていた会社があった。一九八二年に設立されたサン・マイクロシステムズ社である。IBMパソコンと同じようにワークステーションを製造できないかと考えたのである。サン社はIBMパソコンの開発基本方針より一歩進んだ方針を打ち立てた。基本方針は、ネットワーク機能を基本的に持ち、既存の標準品のみを使用してシステムを構築する標準化戦略「オープンシステムズ・ネットワーキング」であった。マイクロプロセッサにはアポロ社と同じくモトローラ社の一六ビット型マイクロプロセッサMC68000、高速システムバスにはマルチバスまたはVMEバス、低速ペリフェラルバスにはIBMパソコン用ISAバス、LANにはイーサーネット、OSにはUNIX、などが選ばれた。アポロ社の欠点は全てクリアされ、しかも価格はアポロ社の三分の一の安さに設定された。サン社はその後ワークステーションでは初めてウィンドウ機能を導入した。コンピューティングパワーが全ての技術者に解放されたのである。
マイクロプロセッサ、パソコン、ワークステーションの発明や開発とは、古い権威主義的な既存システムから自由を個人に取り戻すための破壊と変革、そして新たな価値を持った新システムの建設と価格破壊であった、とも言える。

マイクロプロセッサの特徴

第2節

コンピュータの曙

世界最初の電子計算機ENIACは、米国ペンシルベニア大学のモークリーとエッカートによって一九四三年に開発を開始し、一九四六年二月に完成した。ENIACは真空管を利用した電子的演算機構を持つ自動計算機械であり、真空管を一万八千八百本使用し、プログラムは配線盤のセットによって行われた。そのため、プログラムの変更の度に配線を変更しなければならず、時間がかかり柔軟性に非常に乏しかった。その上、重量は三十トンで一部屋ぐらいの大きさだった。電子計算機に関する特許も収得していた。これらのことが長い間定説となっていた。

ところが、実際には、世界初の電子計算機は、米国のアイオア州立大学のジョン・V・アタナソフ教授と大学院生クリフォード・ベリーによって、一九三九年から四一年に開発された。これは共同開発者の頭文字をとりABCマシンと後世名付けられた。実はENIACマシンは、モークリーがアタナソフに招待されてアイオア州立大学を一九四一年六月に訪れた時、アタナソフによって発明され稼働していた電子計算機とその説明をベースにして開発された。いわば、アタナソフが発明したものを使って開発したので不当な特許収得であった。一九四一年は第二

次世界大戦中で、アタナソフは三十五ページにわたる特許を弁護士と相談しながら書き上げ大学に委託した後、軍事関係の仕事に従事した。不幸なことに、アタナソフの書いた特許は大学関係者の配転により提出されなかった。だがアタナソフにとって幸運だったのは、米国の特許制度は日本と異なり、特許の申請日が優先する先願主義ではなく、発明した日が優先する先明主義であったことである。このため、一九七二年に結審した裁判により、アタナソフ博士の名誉は回復した。

ここで、博士の栄誉を讃えて、現代のコンピュータの基本原理ともなっているアタナソフ博士の発明を記す。アタナソフ博士の成果は、①電子的デジタル型処理の導入、②今までの一〇進法の慣習を破って二進法を採用、③記憶するためにコンデンサ（メモリ、DRAMメモリに類似）を使用し、電気が漏れて記憶が消滅しないように再生処理（DRAMメモリリフレッシュ）を繰り返す、④アナログ計算機のように結果を積算していくのではなく、論理演算回路を使って論理的に演算をその度に行う、⑤すべての演算は順次に処理、⑥演算機構に初めて真空管を使用、などであった。

続いて、プログラムを記憶装置に格納することを可能にさせた今日のコンピュータにつながる、プログラム記憶内蔵方式がノイマンによって一九四五年に提唱された。プログラム記憶内蔵方式は、単なる計算機械の壁を破って、コンピュータを情報処理機械にする画期的な方式で

あった。ノイマンはこの内蔵方式による演算制御機構を持つ電子式自動計算システムEDVACを開発しはじめたが、一足先にケンブリッジ大学がこの内蔵方式を採用したコンピュータEDSACを一九四九年に完成させた。真空管を使った第一世代のコンピュータの完成であった。ノイマンの研究報告書が日本で入手できたのは一九五二年であり、日本ではじめて本格的にコンピュータを紹介した本『計算機械』(城憲三・牧之内三郎共著)が刊行されたのが一九五三年であった。日本におけるコンピュータ研究が本格的に始まった。

アーキテクチャとは何か

コンピュータのアーキテクチャにおいては、命令の機械語の設定はきわめて重要な作業であった。アーキテクチャとは拡大解釈すると、「より多様な、より大きな問題を、より高速に、より柔軟に、より使い易く、より高い信頼度で処理し、かつ安く製造する」ことを可能にさせる「コンピュータに関する構造・枠組みや考え方・仕様」である。建築のアーキテクチャにも通じる考え方である。

ビットとはデータという情報を表現する最小の単位である。一ビットの単位で「〇」と「一」の二つの情報を表現することができる。したがって、四ビットの単位を使用すると十六の組み合わせが可能となる。二進化一〇進法(以下一〇進法という)では十六の組み合わせのうち十組を利用して数字の〇から九を表す。二進法では十六の組み合わせを全て使って〇から一五を表す。メモリの容量や演算回路の作り易さを優先すると一〇進法と比較してより密度の

高い二進法の方が有利である。また、コンピュータに論理的な作業を実行させるのにも二進法が適している。したがって、ＥＤＳＡＣなどの第一世代のコンピュータや一部の第二世代のコンピュータには計算の便利さから一○進法が採用されたが、それ以外の大多数のコンピュータには二進法が採用された。

　ところが、コンピュータが事務計算分野に

ビット：　0

2進符号	10進法	16進法
0	0	0
1	1	1

ディビット（4ビット）：　3210

2進符号	10進法	16進法
0000	0	0
0001	1	1
0010	2	2
0011	3	3
0100	4	4
0101	5	5
0110	6	6
0111	7	7
1000	8	8
1001	9	9

2進符号	10進法	16進法
0000	0	0
0001	1	1
～	～	～
1001	9	9
1010	10	A
1011	11	B
1100	12	C
1101	13	D
1110	14	E
1111	15	F

バイト（8ビット）：　76543210

2進符号	10進法	16進法
00000000	0	0
00000001	1	1
～	～	～
11111110	254	FE
11111111	255	FF

2進符号	アスキー・コード	16進法
00110000	0	30
00110001	1	31
01000001	A	41
01100001	a	61

ワード（16ビット）：　15　76543210

2進符号	10進法	16進法
0000000000000000	0	0000
0000000000000001	1	0001
～	～	～
1111111111111110	65534	FFFE
1111111111111111	65535	FFFF
	（64K；64キロ）	

ダブルワード（32ビット）：　31　2423　1615　76543210

2進符号	10進法	16進法
00000～000000000	0	00000000
00000～000000001	1	00000001
～	～	～
11111～111111110	4294967294	FFFFFFFE
11111～111111111	4294967295	FFFFFFFF
	（4G；4ギガ）	

図1－2　文字と符号の関係

広く使われるようになると、一〇進計算の便利さが小型コンピュータでは重要視された。一九六〇年に発表し大成功したＩＢＭの小型コンピュータＩＢＭ１４０１は一〇進方式のn桁と指定できる可変語長コンピュータであった。この一〇進方式可変語長コンピュータが、プログラム論理方式と一〇進コンピュータ方式を、一九六八年に開発した電卓へ導入させ、一九六九年に世界初の四ビットマイクロプロセッサの発明を生むきっかけとなった。

コンピュータが誕生した頃、入力に印刷電信機の紙テープ装置が使われ、欧米では数字の十文字と英文字二十六文字を上下二段に表示したから五単位（五ビットで三十二個の組み合わせ）ですんだ。ところが、コンピュータ用としては不便であったため、上下二段の切り替えをやめ、六単位で数字と英文字を表すようになった。その後ソフトウェアの進歩に伴い、英大文字のみならず英小文字も使用され、ＡＬＧＯＬなどの高級言語に多数の記号が使われるようになったため、国際標準として八単位のコードが設定された。ＩＢＭは一九六八年に開発した集積回路（ＩＣ）を使用した第三世代コンピュータシステム３６０で八単位（ビット）を一まとめにしてバイト（Byte）という名前を付けた。以後、情報の取り扱う最小単位にバイトを使用している。八ビットマイクロプロセッサの名前の源である。一般的に、四ビットをディジット、一六ビットをワード、三二ビットをダブルワード、六四ビットをクォッドワードと呼んでいる。

家電製品のMPUによるインテリジェント化

家庭における文明度を計る手段として一九六〇年代にはモーターの数が利用された。冷蔵庫、洗濯機、乾燥機、皿洗機、ディスポーザル、掃除機、ミシン、扇風機、エアコン、ガレージオープナー、芝刈機、バーベキュー用ロースター、などなどであった。今日、家庭の文明度はマイコンの数によって計られている。上記のほかに、時計、テレビ、ビデオ、ビデオカメラ、カメラ、留守番電話、携帯電話、ファクシミリ、コピー、電気カーペット、ファンヒーター、電子レンジ、電気釜、などが新たに加わった。

一九六〇年代の製品と今日の製品との一番大きな違いは製品の持つ知能の差である。右の何れの製品にも、製品の使用者が指示を与えるためのスイッチなどの入力手段や、温度や汚れなど外界の状況や製品内部の状況をセンスする入力手段と、製品の内部にあるモーターや電熱部に指示を与える出力手段と、製品内部の状況を使用者に知らせるための表示などの出力手段がある。

だが、一九六〇年代の製品もわずかながら知能を有していた。シーケンサー（逐次制御器）である。昔の洗濯機についていた時間を設定しスタートボタンを押すとコチコチと音を立てて時間を刻んでいったものと思えばよい。この機械式シーケンサーと指示されたスイッチの情報の組み合わせで、洗濯槽の水の量、洗剤の投入時間、つけ置き時間、洗濯の時間や強さ、すす

ぎ洗いの時間と強さ、そして脱水の時間と強さ、などを制御した。これらの全ての制御を機械式シーケンサーを使って制御しようとすると、大変に高価な洗濯機になってしまう。したがって、機械式シーケンサーを使った時代における洗濯機の知能は時間の制御のみであった。また、小規模集積回路ICを使い順序回路を組み電気式シーケンサーを実現したとしても同様な制御が可能であるが、やはり高価な洗濯機になってしまう。

安い洗濯機、高い洗濯機、新製品などといろいろと異なる製品の仕様に合わせてハードワイヤード（配線論理）で組み上げる順序回路の論理回路を設計したり変更するのは、開発においても生産においても厄介なことである。さらに水の温度や洗濯水の汚れ具合を監視しながら最適の洗濯の制御を行おうとすると、論理回路が急激に増大して製造コスト的に大変なことになる。

いわゆるワンチップマイコンを誕生させた四ビットマイクロプロセッサの最大の貢献は、家電製品にコンピューティングパワーを与えたことであり、プログラムという手段により、利用者には便利な機能をもたらし、メーカーには付加価値をもたらした。

マイコンのソフトウェアを変更すれば、異なる機種の洗濯機に同じ制御基板を使用することも可能となり、さらに洗濯のノウハウをプログラムに埋め込むこともできるようになった。未来の電気釜は、「米袋に記載されたGコードを入力すれば米の種類と産地と収穫日と精米日を

読み取った後、全ての制御をマイコンが行い、物凄くおいしいご飯が炊きあがる」ようになるかもしれない。

パーソナルコンピュータを生んだMPU

一九六八年にIBM360メインフレームが開発され爆発的な売れ行きをみせた。またコストパフォーマンスを追求したミニコンも登場し、コンピュータがない場合にはタイム・シェア・サービスのコンピュータを通信回線を介して利用することができた。ただし、テレタイプ入出力機器の速度は十文字/秒と気の遠くなるような低速度であった。マイクロプロセッサ4004を開発したときのことであるが、論理シミュレーションが終わっても結果がなかなか出てこない。一ページ打ち出すのに三分もかかったからである。

一九六九年頃になると、文書の入力と編集ができるインテリジェントターミナルが開発されたが、パソコンのようには安価でなかった。八ビットマイクロプロセッサ8080を開発する頃になると、コンピュータが社内に導入されたが、ターミナルがコンピュータに直接結ばれていたので、コンピュータ室の隣のターミナルルームで回路シミュレーションをしながら、マイクロプロセッサの原画となるマスクのパターン設計の指示を与えなければならなかった。個人にコンピューティングパワーが解放されていない時代だった。

一九七〇年の日本市場における八ビット長のミニコンピュータには、シンシナティ・マイク

ロン社のCIP/2000、ゼネラル・オートメーション社のSPC12、マイクロ・システム社のMICRO—800、日本電気のNEAC—M4、東芝のTOSBAC—10などがあった。ただ、最も安いものでも三千六百ドルで、性能は加減算命令で約一〇マイクロ秒であった。一九七四年頃の八ビットマイクロプロセッサの平均実行時間は約二・五マイクロ秒と決して遅くはなく、ミニコンの低機種にマイクロプロセッサが採用されるようになった。

また、一九七二年にIBM社がフロッピーディスクの開発に成功し、ノイズに強くシステムにおける回路や基板の設計がしやすい四KビットのDRAMが大量にかつ安く市場に出回るようになった。DOS(ディスク・オペレーティング・システム)が可能になった時代である。一九七五年頃になると、米国シリコンバレーではパーソナルコンピュータの出現を誰もが予想するようになった。ただ予想はしたが、マイクロプロセッサと同じく、パーソナルコンピュータの決定版を開発することはできなかった。一九七五年に8080を使って、むき出しの一枚板上にシステムを実現したワンボードシステムなどの汎用性のないシステムは数社から発売された。ただ、そのブームは二年で終わってしまった。

一九七七年はパーソナルコンピュータにとって記念すべき年となった。一九七七年四月に第一回西海岸コンピュータフェアが、ウォーレンによって企画され、開催された。ウォーレンはコンピュータを大企業の手から市民の手に解放しようと、コンピュータ・リブ運動を提唱して

いた。このフェアにアップル社は彼らの二番目の製品である八ビット型パソコンのアップルIIを出品した。アップルIIにはモステクノロジー社の八ビットマイクロプロセッサ６５０２が使われた。

アップルIIの成功はパソコンの開発基本方針に「オープンシステムズ」を採用したことにあった。すなわち、今日で言うＢＩＯＳ（基本入出力システム）と呼ばれる基本ソフトウェアであるモニターのソースプログラムをサードパーティーが利用できるように公開し、いろいろの入出力機器が増設されるように拡張ボード用のコネクターを八スロット分用意し、そのインタフェースの仕様を公開した。これらのことは、サードパーティーにパソコンを解放したことになり、多くの応用ソフトウェアと拡張ボードが開発された。この「オープンシステムズ」の思想は、インテル社の一六ビットマイクロプロセッサ８０８８を使ったＩＢＭ社のパソコンＴｈｅＰＣにも、モトローラ社の一六ビットマイクロプロセッサＭＣ６８０００を使ったサン社のワークステーションＳＵＮ―１にも採用され、パソコンとワークステーションの成功と驚異的な発展に多大な貢献をした。

新しいマイクロプロセッサが誕生すると同時に、全く新たなシステムとビジネスが創出された。その原動力となったのが新世代のマイクロプロセッサが提供するより強力なコンピューティングパワーであった。

LANのネットワーク機能と分散処理機能は村組織

ワークステーションは一九八一年に開発された。この当時のローカル・エリア・ネットワーク（LAN）は、主としてネットワークで結ばれたパソコンが、共有しているプリンタや大容量のディスクを使用するために使われた。ワークステーションを使ったシステムにおいては、処理するデータ量の違いからより高速なLANが使用された。UNIXの提供する分散処理機能を持ったワークステーションが高速ネットワークで結ばれることにより、個々のコンピューティングパワーをさらに強力なシステムパワーに増幅し大きな仕事を可能にさせた。

高速ネットワークで結ばれたワークステーションによるシステムは、昔の村のシステムと非常に似ている。例えば、茅葺きの屋根をふきかえようとすると、一人でやってやれないことはないが、物凄い時間がかかってしまう。ところが、多くの村人が仕事を共同してスケジュールを組んで分担してやれば、短期間に屋根をふきかえることができる。ワークステーションにおいて、共同してスケジュールを組み、分担（分散）して仕事（処理）をさせる機能がUNIXの提供する分散処理機能である。この分散処理機能が次版のウィンドウズNTのCairo版に搭載される予定である。

基本はコンピュータ

マイクロプロセッサを使ったシステムは、基本的にはコンピュータと同じである。システムの心臓部に相当するCPU（中央処理装置）はマイクロプロセッサと呼ばれる。マイクロプロセッサにはシステムバスが設けられており、システムバスを介して、メモリシステムと、各種ペリフェラル（周辺）装置を制御するペリフェラルコントローラが結ばれている。ペリフェラル装置には表示、ハードディスク、CD―ROM、LAN、ビデオなどの高速性が要求されるものと、フロッピーディスク、プリンタ、モデム、オーディオのような低速でも構わないものとがある。

メモリシステムには、BIOSのように固定されたプログラムを格納するROM（Read Only Memory；ロム）と、プログラムとデータを格納する読み書きができるRAM（Random Access Memory；ラム）がある。RAMとしては速度は遅いが大容量化が可能で安いDRAM（Dynamic RAM；デーラム）が使われている。性能向上のために年々、マイクロプロセッサの動作周波数が高くなると同時にシ

マイクロプロセッサ
中央演算処理装置
キャッシュ
メモリ
RAM
ランダムアクセスメモリ
（命令+データ）
ROM
リードオンリーメモリ
（主として命令）
システム・バス
システム
ペリフェラル
時計、
タイマー、
割り込み制御、
DMA
（高速データ転送）
周辺装置制御；ペリフェラル　コントローラ
入力；　キーボード
出力；　表示、プリンタ
通信；　モデム、LAN（ローカルエリアネットワーク）
蓄積メディア；　フロッピーディスク、ハードディスク
CD-ROM、オプティカルディスク
シリコンディスク、
PCMCIA　（カード・メモリー）
メルチメディア；　オーディオ　ボード、TVチューナー、
ビデオキャプチャ、MPEGIカード

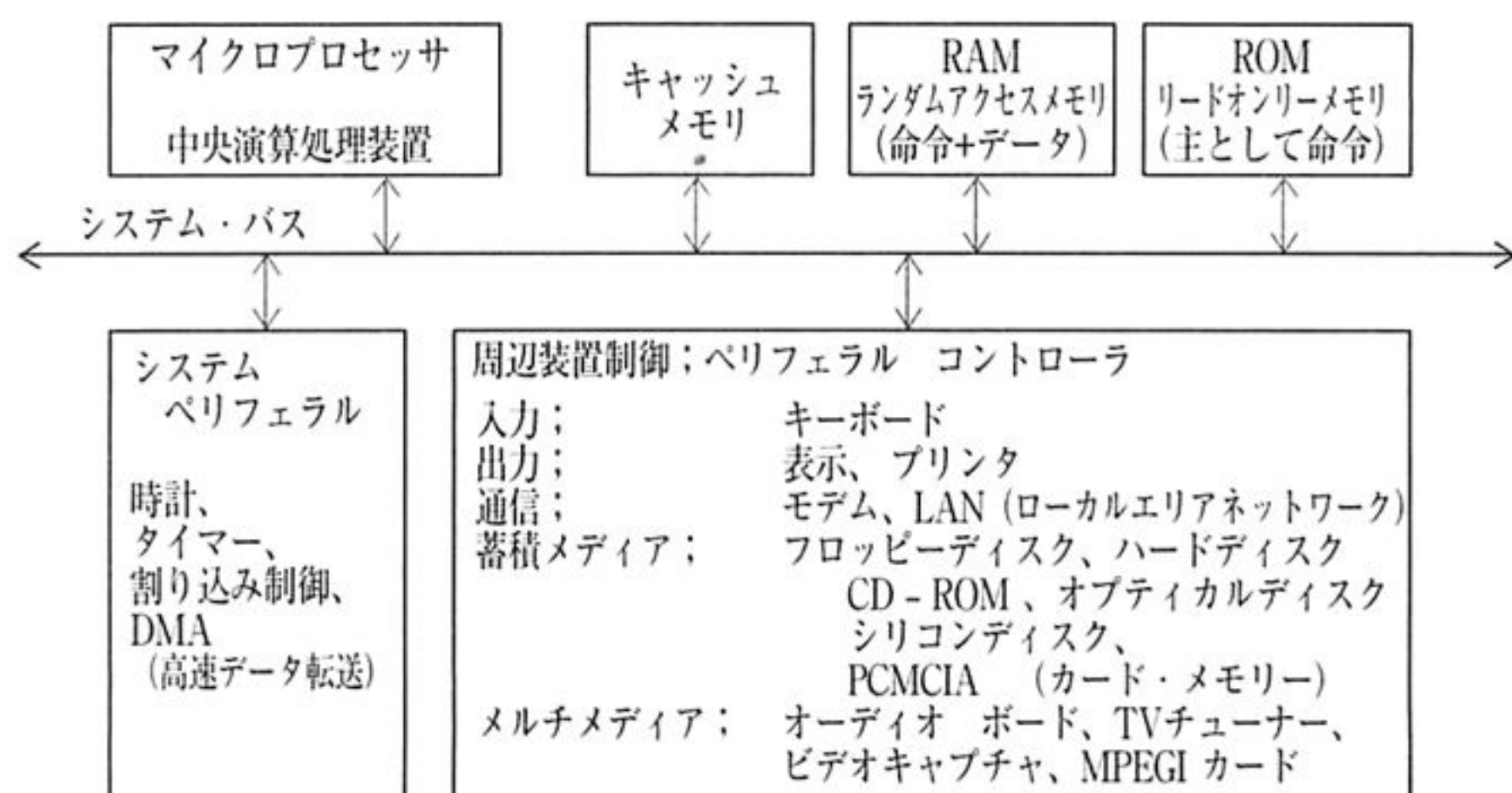



図1－3　システムの概念図

ステムバスの動作周波数も高くなった。このシステムバスとメモリシステムとの速度のアンバランスを解決しているのがキャッシュメモリである。

マイクロプロセッサは、命令をメモリシステムからシステムバスを介して命令レジスタに読み込み、読み込んだ命令を逐次実行する。また、命令に従いマイクロプロセッサとメモリシステムやペリフェラルコントローラとの間でのデータ転送や演算を行う。マイクロプロセッサの命令には整数命令と科学計算に使う浮動小数点命令がある。浮動小数点命令には多くのハードウェアが必要とされるので、整数命令から切り離し、整数命令を担当する主マイクロプロセッサに追加されるように浮動小数点命令用コプロセッサが用意されている。別々のチップにすると、チップ間でのデータや制御の転送に時間がかかり、性能が大幅に低下するのでパソコンに使用されているインテル社の８０４８６ＤＸからは同一チップ内に搭載されるようになった。

マイクロプロセッサという名前は、電卓に使用したマクロ命令と比較してコンピュータ内の機械語に近い、より低いレベルのマイクロな命令を使用するプロセッサということで、４００４中央演算装置（ＣＰＵ）に付けられた。マイクロ・コンピュータ・システムという名は一九七一年のウェスコン・ショーでテッド・ホッフによって４００４システムをＭＣＳ－４(Micro Computer System) として発表したときに初めて使われた。

データ長とメモリ容量と応用の関係

データ長とメモリ容量と応用は互いに密接な関係がある。四ビットのデータ長は一〇進データの取り扱いに、八ビットのデータ長はアルファニューメリック（英文字と数字）に適している。制御機器の大部分の応用であればメモリ容量は六四Kバイトあれば十分である。そのためのアドレス計算に一六ビット長データの演算命令が必要となる。したがって、八ビットマイクロプロセッサには最低限必要とされる一六ビット長データの演算命令しか用意されなかった。アドレス計算以外に一六ビット長データの演算命令が必要な典型的な例として、バイトでは表現できない漢字がある。

三二ビット長データの演算命令が必要な典型的な例としてはNC（数値制御）装置がある。例えば四メートルの物を加工するとき、精度を保つために一ミクロンの単位で計算し移動させるとすると、四百万分の一すなわち二九ビットのデータ長が必要となる。三二ビット型マイクロプロセッサが出現しなかった頃に、一六ビット型マイクロプロセッサ８０８６がNCで採用されたが、三二ビット長データの演算命令を持つZ８０００やMC６８０００が開発されると同時に三二ビット長データの演算命令を持たない８０８６はNC装置の市場では衰退してしまった。

マルチメディアの応用を考えると、正確さを保つために、音声（Ｖｏｉｃｅ）では一六ビット、オーディオでは二四ビット（ステレオ出力としては一六ビットで十分）、グラフィックス

では浮動小数点単精度または固定小数点三二ビットが必要である。ブラウン管ディスプレイ（CRT表示）を例にとると、ウィンドウズでの表示を美しく出すためには一〇二四×七六八ドットの表示モードが最適である。もし、カラー表示で二五六色を選択すると約七八六Kバイト（一Mバイト）、六四K色を選択すると約一五七二Kバイト（二Mバイト）のビデオメモリが必要となる。ブラウン管表示では表示したデータはブラウン管上に保存されないので、ビデオメモリを用意して一秒間に三十回繰り返しビデオメモリの内容を表示する必要がある。そのためには二一ビットのアドレス計算が必要となる。

DTPと浮動小数点演算

一文字の漢字を表示するために、標準で二四×二四のドットフォントが使われていた。ところが、DTP（Desk Top Publishing）がレーザービームプリンタ（LBP）との組み合わせで簡易印刷として広く使われるようになると、文字フォントとして文字パターンであるドットフォントの代わりにアウトラインフォント（輪郭線フォント）が採用されるようになった。ドットフォントを使用すると各書体のフォントだけでなくプリントや表示する大きさの全てのフォントを用意しなくてはならず、膨大な量のメモリが必要となる。ところが、アウトラインフォントでは各文字の輪郭を表現できる点の座標と各点を結ぶ曲線を表す式のデータのみをメモリに用意する。出力するときに、まず輪郭線を描き、次にその中を塗りつぶす。したがって、明朝体とかゴチック体とか

異なる書体のフォントを一つずつ用意すれば、拡大や縮小は思いのままになり、しかも表示にも同じ文字を描くことが可能となり、表示したものと全く同じものがプリントされるようになる。文字の大きさをポイントで指示すれば、後はパソコンが全部やってくれるようになり、人間の表現能力を大幅に増幅した。

この計算のために三二ビット長データの高速演算が必要となった。そこで、三二ビット長の演算命令を持たない８０８６がＩＢＭパソコンに採用されたとき、浮動小数点用コプロセッサ８０８７がＤＴＰアプリケーションを必要とした欧米と香港で多く売れた。日本には日本語用ＤＴＰアプリケーションがなかったので、８０８７はパソコンにはほとんど搭載されなかった。しかし、三二ビット型マイクロプロセッサ８０３８６が登場して三二ビット長データの高速演算が可能になっても、８０８７の神話が生きており、８０３８６用浮動小数点用コプロセッサ８０３８７がパソコンに搭載された。

パソコンの表示画面やプリンタが高密度化され、マイクロプロセッサが高性能化されるに伴って、ＣＡＤが回路設計、シミュレーション、半導体やシステム基板のパターン設計、服の設計、建築設計に使われ、より高性能な浮動小数点用コプロセッサが必要となった。ただし、浮動小数点用コプロセッサがない場合には、速度は大幅に遅くなるが、ソフトウェアで浮動小数点演算をエミュレーション（模擬）できる仕組みが大半のソフトに付加されている。

システムの性能を決める六大要素

システムの性能を決める要素には六つある。マイクロプロセッサ、システムバス、二次キャッシュを含めたメモリシステム、ハードディスクシステム、表示、そしてプリンタである。高性能マイクロプロセッサを採用するときに、システムバスとメモリシステムをいかに組むかで性能が左右される。通常、パソコンの主メモリには七〇ns（ナノ秒）のDRAMメモリが使われている。三二ビットマイクロプロセッサ386の動作周波数は一六MHz（一クロックサイクルが六二・五ns）であった。メモリへアクセスするために二クロック分の時間（一二五ns）を使ったので遅いメモリを使っても性能には影響がなかった。ところが、486の時代になると、動作周波数が三三MHzに向上したため、遅いメモリを使うと、性能が二〇%以上低下してしまう。この主メモリとマイクロプロセッサの速度差を埋めるため、両者の中間に高速のキャッシュメモリを設置するようになった。

一般的に、プログラムやデータは同じところがアクセスされる頻度が高く、その局所性を利用して、最近アクセスされた命令やデータをキャッシュメモリに保持し、見かけ上のメモリアクセスの性能の向上を図っている。メモリへのアクセスが生じたときに、キャッシュメモリに保持された命令やデータが使われる率がヒット率である。486からはキャッシュメモリが内蔵され、一次キャッシュと呼ばれている。ただ、大きなキャッシュメモリは内蔵できないので、

外部にもキャッシュメモリが設置されており、二次キャッシュと呼ばれている。
　また、アプリケーションを応用分野別に大別すると三種類ある。一番目の応用分野は科学技術計算や回路設計、パターン設計、各種シミュレーションなどの技術系CADで代表されるアプリケーションで、マイクロプロセッサ内の一次キャッシュのヒット率が九四%と高くマイクロプロセッサ本体の性能がシステムの性能に大幅に影響を与える。二番目の応用分野は、Ａｕｔｏ　ＣＡＤのように個人が使うＣＡＤで、一次キャッシュのヒット率が約九〇%ぐらいのアプリケーション。三番目の応用分野は、パソコンにとって科学計算やＣＡＤ以外で最も重要であるワープロや表計算などのＯＡ用アプリケーションである。一次キャッシュのヒット率が約八五%と低いのでシステムバスとメモリシステムが性能に大きな影響を与える。
　一時期、二次キャッシュを搭載しないパソコンが市場に出たことがあるが、メモリシステムをよほど上手く組まないと、システムの性能は二次キャッシュを搭載した場合と比較して一〇%以上低下してしまう。そのようなシステムに内部動作周波数が入力動作周波数の二倍である、いわゆる倍速マイクロプロセッサを搭載しても、予想どおりの性能が期待されない場合が多い。また、三二ビット幅のデータバスを持つシステムに、基本的に六四ビットのデータバスを持つマイクロプロセッサを使うと、一〇から一七%ほど性能が低下することが予想されるので注意が必要である。

性能低下を防ぐため、IBM社の倍速プロセッサ486SLC2やインテル社の四倍速プロセッサ486DX4は内部の一次キャッシュの容量を八Kバイトから一六Kバイトに増大させている。一次キャッシュの容量の増大により性能が一〇%以上向上し、同時にマイクロプロセッサが外部の主メモリにアクセスする回数が減少し、マイクロプロセッサによるシステムバス占有率が減少するので、システム全体の性能も向上する。プリンタを多用するユーザーでは、高性能なマイクロプロセッサは印刷する文書をプリンタ用に展開するのにマイクロプロセッサ本体の性能が重要となるので、真性マルチタスクが使えないオペレーティングシステムを利用するパソコンでは、できる限り高性能なマイクロプロセッサを搭載した方が望ましい。アプリケーションによってシステム各部の性能に対する要求が異なるので、性能を決める六大要素に注意を払う必要がある。

MPUには三種類のアーキテクチャがある

マイクロプロセッサには、事務用計算機で採用されたメモリ－メモリタイプ・アーキテクチャ（データが全てメモリ内にある）と、CISCプロセッサと呼ばれている伝統的なマイクロプロセッサが採用したレジスターメモリタイプ・アーキテクチャ（データがプロセッサ内のレジスタとメモリにある）と、RISCプロセッサで採用したロード／ストアタイプ・アーキテクチャ（メモリへのアクセスには読み書きの命令だけを使う）がある。

第3節　マイクロプロセッサによるシステムの成長

三十年前のオフィス風景

三十年前にオフィスにあった機器は電話、電動加算器、手回し計算器、計算尺、ジアゾ式湿式複写機と電動タイプライタではなかっただろうか。一九七五年に筆者がZ80を開発した頃の機器は電卓、電子式複写機、一枚ずつ円筒に巻いて送るファクシミリ、I/Oタイプライタ、回路設計のためのメインフレームと半導体チップのパターン設計用コンピュータであった。もちろん、ワードプロセッサもない時代であった。そこで手紙を作るためにI/Oタイプライタが使われた。顧客の住所、名前や各種の決まり文句を紙テープの規格に合わせて、エッジカードにデータを穿孔しておき、人間がタイプする代わりにエッジカードを読み込みタイプさせ、それ以外を人間がタイプするやり方である。

この頃、製品の試案をA4サイズ用紙二枚にまとめる必要があった。理解させやすくするために強調する文章と参考に必要な文章を区別したり、チップのブロック図や波形図があったりして、今日の典型的なDTPのアプリケーションであった。また、マイクロプロセッサの具体的な論理設計の前に、まず各命令に対しての内部の動作を記述する作業がある。総トランジス

タに影響を与える論理回路数と、仕様の最適化のために内部動作のタイミングや定義を変更する作業が多かった。コンピュータを使ってそれらの入力や編集はできたが、ライン（行）単位にしかできないから、非常に不便で生産性が悪く実用には不向きであった。今日のように領域が指定でき、かつ図形も描けるようなワープロがあれば生産性がどれほど上がったことだろうか。
その頃、最も役に立ったＯＡ機器は拡大縮小ができる電子式複写機であった。文章や図面を描いてから拡大縮小して、さらに切り貼りをしてＤＴＰ機能を実現した。プロジェクトを開始するに当たって、何が必要かを考えて、最初に

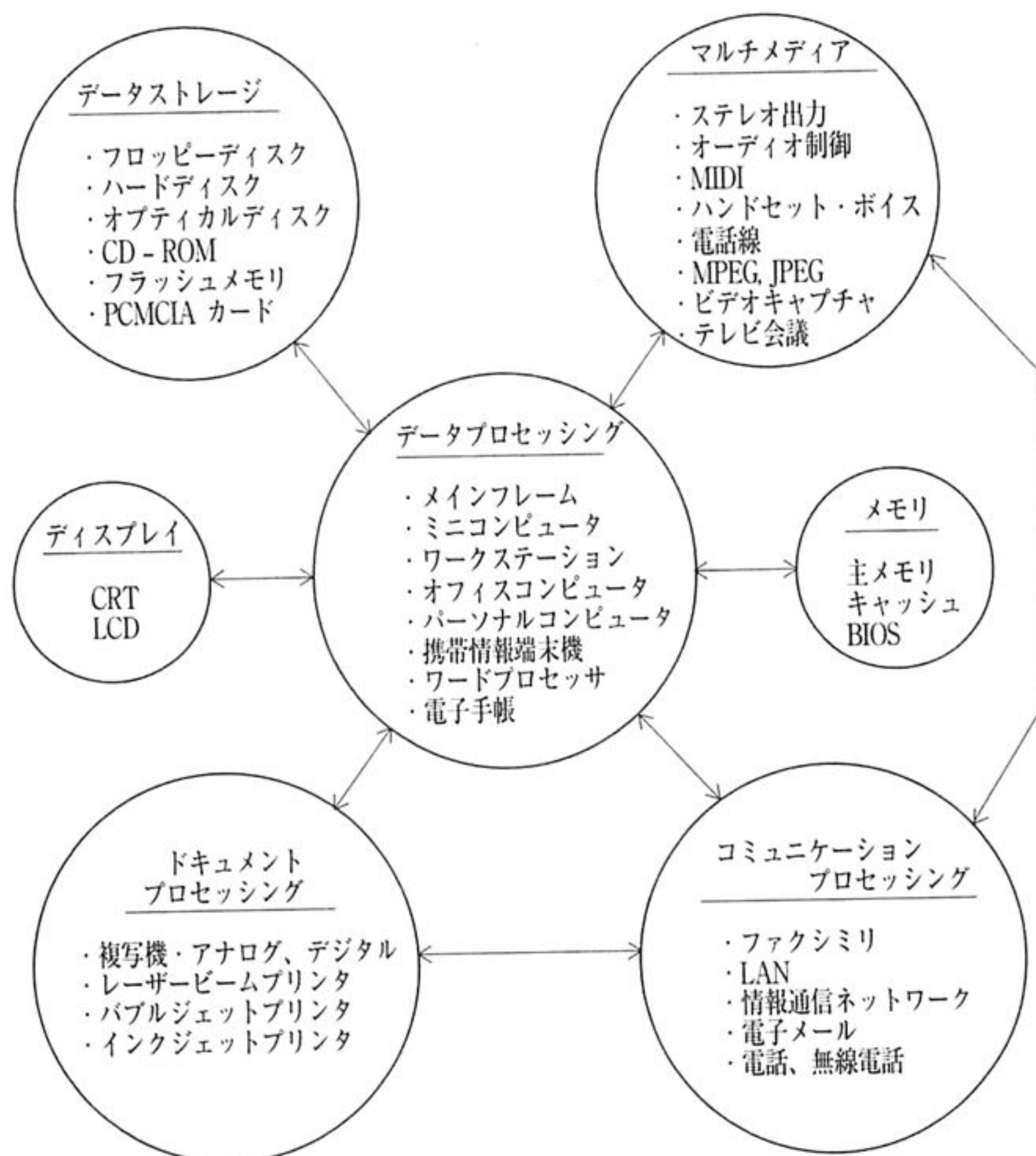



図１－４　システムの構成図

拡大縮小ができる電子式複写機を購入した。信じられない話である。オフィスの生産性向上が渇望されていた時代であった。

マイクロプロセッサによるオフィス革命

ＯＡシステムは大きく五つに分類できる。パソコンやワークステーションなどのようにデータを処理するデータプロセッシング機器、処理されたデータを人にわかるように表現するためのプリンタや複写機などのドキュメントプロセッシング機器と表示機器、ファクシミリやＬＡＮなどのようにデータを送受信するコミュニケーションプロセッシング機器、データを格納するハードディスクやＣＤ―ＲＯＭなどのデータストレージ機器といま立ち上がりつつあるマルチメディア機器などである。一九八〇年代に大きな成長を見せたデータプロセッシング機器の特徴はアプリケーションソフトウェアを買ってきて、利用者がデータを作成することであった。その結果、人間の編集能力、処理能力、表現能力が増幅された。

一九九四年と三十年前と比較すると、驚くほどの数の新製品が創出され、機能が強化されている。強力なコンピューティングパワーを持ち、コストパフォーマンスに富んだマイクロプロセッサという知的能力が驚異的な発展をＯＡ機器にもたらした。マイクロプロセッサの発展と新システムの誕生、発展については第二章で詳しく述べる。

パソコンとワークステーションの成功は、システムの「オープンシステムズ」と「標準品の使用」であると述べた。とくにパソコンの量的な大成功は、販売に対しての「オープンシステムズ」の導入によりもたらされた。

ビジネスの仕方とデータ量と分散処理の違い

メインフレームやワークステーションのビジネスの仕方とは異なり、パソコンではユーザーが小売店または通信販売を通して購買し、システムとソフトウェアのセットアップを行い、アップグレードを含めた保守サービスを行っている。このため、販売価格を低く抑えることができ、量が期待されるのでソフトウェアも安くなった。IBMの最初のパソコンThePCはパソコン販売の大手であるコンピュータランド社と巨大小売店であるシアーズ社のシアーズ・ビジネス・センターを通して販売された。一方、ワークステーションではメーカーが直接販売を担当し、メーカーまたはベンダーの技術者がシステムやソフトウェアのセットアップと保守を行っている。ワークステーションはパソコンに近づきつつあると言われるが、ビジネスの仕方が変わらない以上同じ土俵では戦えない。

ワークステーションがパソコンと異なる二番目は、取り扱うデータの量と浮動小数点演算の必要度である。典型的な例が半導体やシステムの論理や回路やパターンの設計、各種のシミュレーション、機械や建築の設計、などである。データの量が少なければパソコンの性能で十分

だろう。データ量が極端に大きくなると、メインフレームでも遅いと感じることがある。
半導体チップの開発を例にとると、チップ設計の最後に回路図とパターン図が一致しているかを調べる配線検証（コネクティビティチェック）とパターン図が半導体プロセスの規則通りでき上がっているかを調べる設計規則検証（デザイン・ルール・チェック）がある。また、論理が少しでも変更されれば論理シミュレーションをやり直さなければならない。一時代前のワークステーションでは、全ての仕事を一回だけするために二週間ほどかかった。十倍の性能があるワークステーションでも一日半かかる。また、ワークステーションの性能が上がる頃にはチップも大きくなる。
大きなデータ量、すなわち仕事量を短期間で終了させるために、主メモリを大きくする方法がある。主メモリを大きくすればハードディスクと主メモリのスワップ（入れ換え）が少なくなり、性能向上に大きく貢献する。だが、どの位大きくするかが問題である。数年前でも一ギガ（一〇〇〇メガ）バイトの主メモリを用意した。パソコンのハードディスクの倍の容量である。超高性能が要求されるアプリケーションでは二年ごとに一ギガバイトずつ主メモリが大きくなっている。これが六四ビット型マイクロプロセッサが必要となる大きな理由の一つである。また、高性能システムバスに幅の広い六四ビット以上のデータバスが必須となる。さらに、非常に大量のデータをLANを通して送るために、二種類以上のネットワークが必要となる。一

つはユーザー数は少ないが大量のデータを取り扱う技術系向けネットワーク、もう一つはユーザー数は多いが少量のデータを取り扱う事務系向けネットワーク、などである。また、事務系のソフトウェアと異なり、技術系の応用では非常に高性能な浮動小数点演算用コプロセッサが必要である。そのため、ワークステーション用のRISCプロセッサはパソコン用のマイクロプロセッサと比べてはるかに高性能な浮動小数点演算用コプロセッサを搭載している。

パソコンとワークステーションの違いにはもう一つある。たとえパソコン同士が高速ネットワークで結ばれたり、いくつかのアプリーケーションが同時に実行できるマルチタスクオペレーションが可能になったとしても、パソコンはあくまでも個人が占有して使う機械である。一方、ワークステーションの顕著な特徴は、高速ネットワークで結ばれた分散処理が可能であることと、いくつかのマイクロプロセッサを搭載して性能向上が図れるマルチプロセッサ方式が使えることである。分散処理とは、自分の仕事を他人のワークステーションに依頼して実行させたり、他人の仕事を自分のワークステーションで実行させたりする、いわゆるマルチユーザーシステムである。そのためには、より高い性能のマイクロプロセッサとより大きなメモリが必要とされる。マイクロソフトのウィンドウズ3・1やIBMのOS／2、アップルのシステム7はパソコン用のOSであり、マイクロソフトのウィンドウズNTはワークステーション用のUNIXに対抗するOSである。

マルチメディアの技術には四種類ある。オーディオプロセッシング技術、スピーチプロセッシング技術、イメージとビデオプロセッシング技術とテレコミュニケーション技術である。

マルチメディアシステムへの進展

テキスト（文字）とグラフィックス（絵）技術はパソコン誕生直後の技術の改良で事足りた。マルチメディアでは動画を取り扱うので、ワークステーションのアプリケーションと同じく、データの量も非常に大きい。一画面で約一メガバイトのデータ量がある。人間の目に自然と思わせるには一秒間に三十画面が必要となる。一秒間に一〇メガビットしか送れない通常のLANでは動画をそのままでは送れない。そこで、通信、放送、蓄積メディア、コンピュータの分野で共通に用いられるように、デジタル動画像や音声の符号化（圧縮）の国際標準MPEGが決められた。最初のMPEG1はビデオCD対応でカラオケに使われている。最終的に、高画質化への要求を満たすために、MPEG2が採用された。この方式は将来のデジタルテレビにも採用される重要な技術であり、現在、各社がMPEG2専用チップを開発中である。

動画のサイズを小さくすればマッキントッシュがやっているようにソフトウェアで動画を取り扱うことができる。このため、IBMやHP、サンが開発している、超高性能マイクロプロセッサで処理しようとしてマルチメディア対応の命令を組み込んだマイクロプロセッサもある。また、マルチメディア機器をサポートするために、高速の信号処理プロセッサDSP（Digital

Signal Processor）を使って、ステレオ出力、MIDI出力、マイクロフォン入力、電話とのインタフェースを処理するマルチメディアボードが市場に登場するようになってきた。

アーキテクチャの本当の戦争が始まった

一九八一年にIBMのパソコンが出現して非常に大きな市場が形成されると、標準化と互換性が最重要視される

システムの種類	OS または 製品	使用プロセッサ	
メインフレーム	独自OS, UNIX	IBM：	3090－390
ミニコンピュータ	VMS	DEC：	VAX／Alpha
オフィスコンピュータ	独自 OS UNIX ワークプレース OS	IBM：	独自プロセッサ 独自プロセッサ RISCプロセッサ PPC620＋α、 AS／400CPU
ワークステーション と サーバー	各種 UNIX と Windows－NT と AIX	HP： IBM： DEC： MIPS： サン： インテル：	PA－7150／7200 POWER2, PPC620 Alpha－21064A R－4400 Super SPARC X86
パーソナル コンピュータ	Windows 3.1 Windows－NT Mac OS （System 7）	インテル： インテル： IBM： DEC： MIPS： HP： サン： モトローラ： IBM：	X86 X86 PPC601／3／4／20 Alpha 21064 R－4400／4600 PA－7100 Super SPARC 680X0 PPC604／1／3／20
携帯情報端末機	Windows （マイクロソフト） ニュートン（アップル） ズーマー マジックキャップ テレスクリプト	インテル： ARM： インテル： モトローラ：	386SX ARM6／7, Power PC 8086 68349
セット・トップ ・ボックス (ビデオ・オン ・デマンド)	OS9 （マイクロウェア）	モトローラ： インテル： IBM： ARM：	680X0 386SX PPC ARM6／7
ゲーム	3DO （オプション） プレイステーション NEC セガ 任天堂	ARM： IBM： MIPS： NEC： 日立： MIPS：	ARM6, Power PC＋α、2個 R3000＋α V800 （NEC） SH7000 （セガ） R4600 （任天堂）

図1－5　システムの分類－I

と同時に、互換性自体がビジネスになった。まず、互換製品のビジネスはパソコン本体から始まり、IBMパソコンのクローン機（複製機）が登場した。次に、パソコンのシステムを構築するのに必要ないろいろのペリフェラルチップを集積したシステム・ペリフェラルチップがチップス&テクノロジー（C&T）社で開発され、BIOSがフェニックス社やAMI社で開発された。一九八〇年代後半頃から、システム用チップ

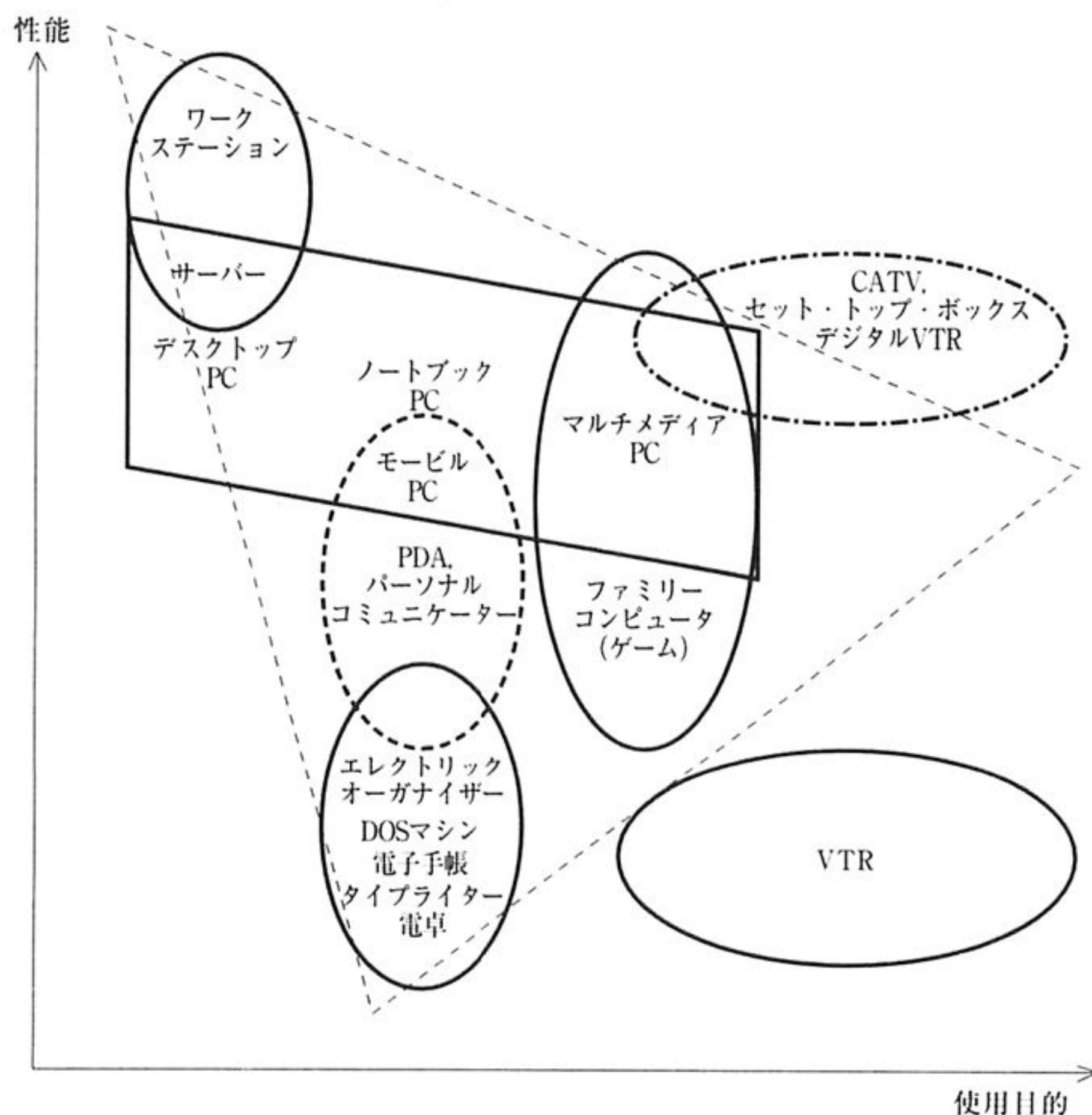



図1−6　システムの分類−Ⅱ

パソコンの成功は、表計算(電卓)、ワープロとDTP(タイプライター)、アミューズメント(ゲーム)、性能(ワークステーション)、などの機能の実現によりもたらされた。

を販売している会社が自社のシステム・ペリフェラルチップを使ったパソコンの回路図だけでなく、マイクロプロセッサやメモリが搭載されているマザーボードのパターン図も、パソコン製造会社に無償で提供するようになった。この二つの製品により、非常に簡単にＩＢＭ互換パソコンを設計することができるようになった。

一九八〇年後半に、台湾においてパソコンの大量生産が始まり、現在、パソコンのマザーボード生産では台湾が世界市場の約八割を占めている。さらに、互換ビジネスはマイクロプロセッサに移り、ＡＭＤ、サイリックス、ＩＢＭ、ネクスジェン、ＴＩなどがＸ８６互換マイクロプロセッサの開発に成功した。現在は、オペレーティングシステム互換の時代を通って、マザーボード互換の時代に入った。ＩＢＭパソコンの世界においては、一六ビットマイクロプロセッサ８０２８６から三二ビットマイクロプロセッサ８０３８６に進化した段階で、アーキテクチャ的な進化は終了して、３８６以後の４８６やペンティアムは３８６互換の単なる高性能マイクロプロセッサである。

一九八〇年代後半に入って、種々様々な高性能ＲＩＳＣプロセッサが登場した。分散処理とマルチプロセッサ機能に特徴を有するＵＮＩＸと競合するマイクロソフトのウィンドウズＮＴは、それらのＲＩＳＣプロセッサにも移植されるが、主流はインテルのＸ８６マイクロプロセッサである。ＲＩＳＣプロセッサを使った量産普及版のＵＮＩＸ版のワークステーションはウ

インドウズNTシステムによって駆逐される。しかし、IBM系パソコンの世界では、インテルは強力なX86互換マイクロプロセッサと戦い、X86エミュレーション機能を提供する高性能RISCプロセッサとの戦いに備えつつ、PowerPCを搭載したマッキントッシュとも戦わなければならない。

また、ワークステーション陣営はマルチメディア用命令や三次元グラフィックス用の超高性能浮動小数点用命令を準備して、X86に対抗しようとしている。一方、インテルも二〇〇〇年への布石としてHPとの次世代マイクロプロセッサ開発に関しての提携を結んだ。それらの詳細は第四章で述べる。誰が勝者になるか予測はできないが、勝者への鍵を握るソフトウェアとハードウェアの両方に卓越した創造者が出てくるだろう。

第2章

マイクロプロセッサはどのように生まれたのか

マイクロプロセッサの誕生

第1節

電子式卓上計算器の誕生と発展

電子式卓上計算器は、一九六〇年代初頭にイギリスのアニタ（ANITA）社により、真空管を使って開発された。しかし、真空管式のため寸法も消費電力も大きく、日本ではほとんど普及しなかった。ただ、その衝撃は大きく、シャープ、大井電気、カシオ、キヤノン、ビジコンなど多くの日本の会社が電卓の開発に着手し、一九六四年にシャープがトランジスタ電卓の開発に成功した。それは、フルキー式十二桁で四則演算だけができる電卓で、幅四十二センチ、奥行四十四センチ、高さ二十五センチ、重量二十五キログラム、価格五十万円強であった。その後一九六六年、ビジコン社がメモリ付き電卓を二十九万八千円で市場に投入したことにより、電卓ビジネスが急速に発展して、今のパソコンと同じように、激しい価格競争と性能向上の時代に突入した。

一九六七年、二百個ほどのＩＣを使ったＩＣ電卓が各社から販売された。またＣＲＴ（ブラウン管）を表示に採用し、利用者がプログラムできる科学計算用電卓も出現した。この当時の電卓の価格は桁数で決められており、一桁あたり約一万円であった。当時、電卓は事務の生産性を飛躍的に上げることができて、あたかも今日のパソコンと同様の価値があり、世界の市場

を日本がほとんどおさえてしまった。したがって、日本のメーカーが電卓をOEMとして欧米に輸出するケースが年々増加した。後年、プログラム論理方式を電卓に導入したのはこのOEMビジネスのための電卓開発を短期間にかつ低コストで行うためであった。

LSIの使い方にいろいろあった

一九六〇年代後半に入ると、米国の半導体産業界はLSIによるメモリ技術を着実に確立しつつあり、さらに量のメリットを追求できる電卓市場に参入することを開始した。一方、日本国内の電卓業界は、高性能化、多様化、低価格化、軽量化、そして高信頼性化への道を模索していた。こうした、日米間の何か起きそうな熱気の中で、集積度こそあまり高くはなかったが、シャープがノースアメリカン・ロックウェル（現在のロックウェル・インターナショナル）社に開発依頼した四チップのLSIによる電卓を一九六八年に発表し、電卓業界は電卓のLSI化に向けて一斉に走り出した。

シャープのLSIはキーボード／表示、アドレス制御、小数点制御、中央計算ユニットで成り立っていた。しかし、配線というハードウェアで固定されているハードワイヤードによるランダム論理方式を採用したために柔軟性が全くなく、電卓の機能を変更しようとすると全てのLSIを変更しなくてはならなかった。したがって、当時としては低価格化が重要であった大量生産用電卓には最適な方法であったが、ビジコンが狙っていた方向とは全く違っていた。

一九六八年にビジコンでプリンタ付き電卓用に開発した、一〇進コンピュータを使ったプログラム論理方式は、電卓の機能の作成や変更、追加に対して柔軟性のある新式の論理方法だった。当時、メモリは主にコンピュータ用に使われており、電卓用にシフトレジスタというメモリが開発されたが、非常に高価だった。たった一個のメモリのコストが、電卓に使う集積回路部品コストの約二五％ほどで、給料の四分の一ぐらいだった。したがって、電卓のＬＳＩ化には、電卓用のプログラムをメモリに書き込むことにより電卓の機能を実現するプログラム論理方式（ストアードプログラム論理方式）と、メモリが高価であったため、二進コンピュータ方式ではなく、小容量のメモリで実現できる一〇進コンピュータ方式が選択された。マイクロプロセッサ４００４の誕生は、論理を主体に考える会社とメモリを主体に考える会社との融合による成果とも言える。

電卓にも使える一〇進コンピュータのＬＳＩ化のアイデア

より高い集積度を求めて、ビジコンは米国の調査会社に依頼して高密度半導体プロセスを持つ会社を探した。ビジコンの大阪工場（日本計算器）はワンチップ電卓を開発すべくモステック社と契約した。私が属していた東京工場（電子技研）はインテル社と契約した。当時のインテルは、カリフォルニア州マウンテンビュー市にあり、建物と半導体装置をリースして事業を開始したばかりの、設立後一年の従業員が二百人に足りない規模の会社であった。インテルは新世代の半導体プロセスで

ある、集積度が高いシリコンゲートＭＯＳ技術を開発し、磁気コアメモリを半導体メモリで置き換えようとしていた。一九六九年六月、私はビジコンの社員として、電卓にも使える一〇進コンピュータのＬＳＩをインテルと共同開発するため渡米した。

ビジコン社の目的は、一〇進コンピュータを基本においた汎用ＬＳＩをインテルと共同開発することだった。これは計算機能のほかにかなりの入出力機器（キーボード、メモリ、表示、プリンタ、ＣＲＴ、ＩＢＭカードなど）を持った電卓や、伝票発行機や銀行の端末機などのＯＡ機器にも使えるものであった。一九六八年春に、私はビジコンにおいて、電卓の機能を実現するためにＲＯＭにプログラムを格納したストアードプログラム論理方式（プログラム記憶内蔵方式）を開発し、プリンタ付き電卓に応用して成功した。その開発したプロセッサはｎビットというバイナリ（二進）データも取り扱かったが、主として一〇進のｎ桁というデータ列を取り扱う一〇進コンピュータであった。

この一〇進コンピュータはＩＢＭが小型コンピュータ１４０１に採用した一〇進式可変語長コンピュータと同様な方式であった。私がインテルに提案したＬＳＩは、一〇進データ用の主演算回路、プログラム制御、プログラムを格納するＲＯＭ、シリアルに格納されているデータを右や左にシフトすることにより指定したデータを読み書きできるメモリであるシフトレジスタ、キーボードと表示の制御回路、プリンタ制御回路などであった。

インテルでは、共同開発者として、コンピュータ、ソフトウェア、回路などに詳しいホッフ博士と、ソフトウェア応用技術者のメイザーが担当者になった。〝生みの苦しみ〟とはよく言ったもので、実際に作業に入ると、壁にゴツゴツ突き当たる日が少なくなかった。打ち合わせを始めると二つの問題があることがわかった。まず第一の問題は、インテルはLSIの電卓への応用を全くと言っていいほど理解していなかったことであった。米国においては、当時、電卓製造会社としては科学計算用電卓を製造していたヒューレット・パッカード（HP）社しかなかった。

第二の問題は当時、メモリを専門に開発していたインテルには論理設計がわかる技術者が一人もいなかったことである。このため、私が提案したLSIの仕様や論理図を理解してもらうことが非常に困難だった。この時点でインテル側はビジコンの提案はインテルでは設計不可能と判断したらしい。論理設計者を雇っても一人だけという条件だったらしく、チップの種類が多いことと、ビジコンが示した論理が複雑らしいことが問題となった。論理設計者から見ればなんでもないが、論理設計をしたことのない人が見れば混沌の世界に見えただろう。最後までわからなかった問題は、多くの端子数を必要としないメモリしか製造していないインテルには十八本以上の端子数を持つパッケージを用意する意思がなかったことであった。これらはあとでわかって、これが米国式交渉方法かとがっかりした。

ビジコンとインテルにとって幸運なことに、ホッフは私が提案した電卓のストアードプログラム論理方式、その一〇進コンピュータ用の命令と制御用命令、電卓のプログラムなどに非常に大きな興味を示した。なんとか問題を解決しようとして、電卓の機能、プリンタ、キーボード、表示、電卓のプログラム、電卓用の命令、などを克明に説明した。

四ビットマイクロプロセッサ4004のアイデア

共同開発が暗礁に乗り上げそうになった一九六九年八月下旬のある日、ホッフが数枚のコピーを片手に、興奮気味に、突然、私の部屋に飛び込んできた。ホッフが最初に示したブロック図には、プロセッサの骨格だけがあった。四ビットの主演算回路の箱と、十六個の四ビット長レジスタの箱と、プログラムカウンタを含む一二ビット長の四段スタックレジスタの箱、のみが描かれていた。スタックレジスタは、繰り返し同じプログラムを使うときに、繰り返し使うプログラムに移ったときに戻り番地を一時的に格納するレジスタで、四段あると三段の深さまで順々と中へ入っていく（ネスティング）ことが可能となる。三段あれば私が示した電卓用プログラムが実現可能であった。すなわち、私が提案した一〇進データ用のマクロ命令で構成している一〇進コンピュータを四ビットのマイクロな命令で構成する二進（バイナリ）コンピュータに変更しようという提案であった。これが世界初のマイクロプロセッサ4004の〝産声〟であった。

ホッフが後年語ったことの中に、「ビジコン社の要求は、電卓のファミリー全体に使えるL

SIが欲しいという特異なものであり、それを個々の製品とするために、ROMプログラム技術を使おうとしていた。しかし、私はむしろ、プログラム機能を多少持った電卓として作るよりも、それを、電卓として使えるようにプログラムできる、汎用コンピュータのようなものにしたいと思った」とある。応用に関しては私が提案したことを十分把握していたようであった。電卓という応用分野からの特異な要求と、一〇進用コンピュータのLSI化という初期的なアイデアが、四ビットの二進コンピュータという新たなアイデアへ導く原動力となった。ホッフがスタンフォード大学の研究所に勤めていたときに、IBM1401コンピュータを経験していたことが共通のバックグランドになったのだろう。また、私はハードウェア出身ではなくソフトウェアからハードウェアに入ったので、ホッフ達との議論に違和感を感じなかった。

電卓の論理方式は、配線を使って論理を実現した固定式のハードワイヤードのランダム論理方式というハードウェア的

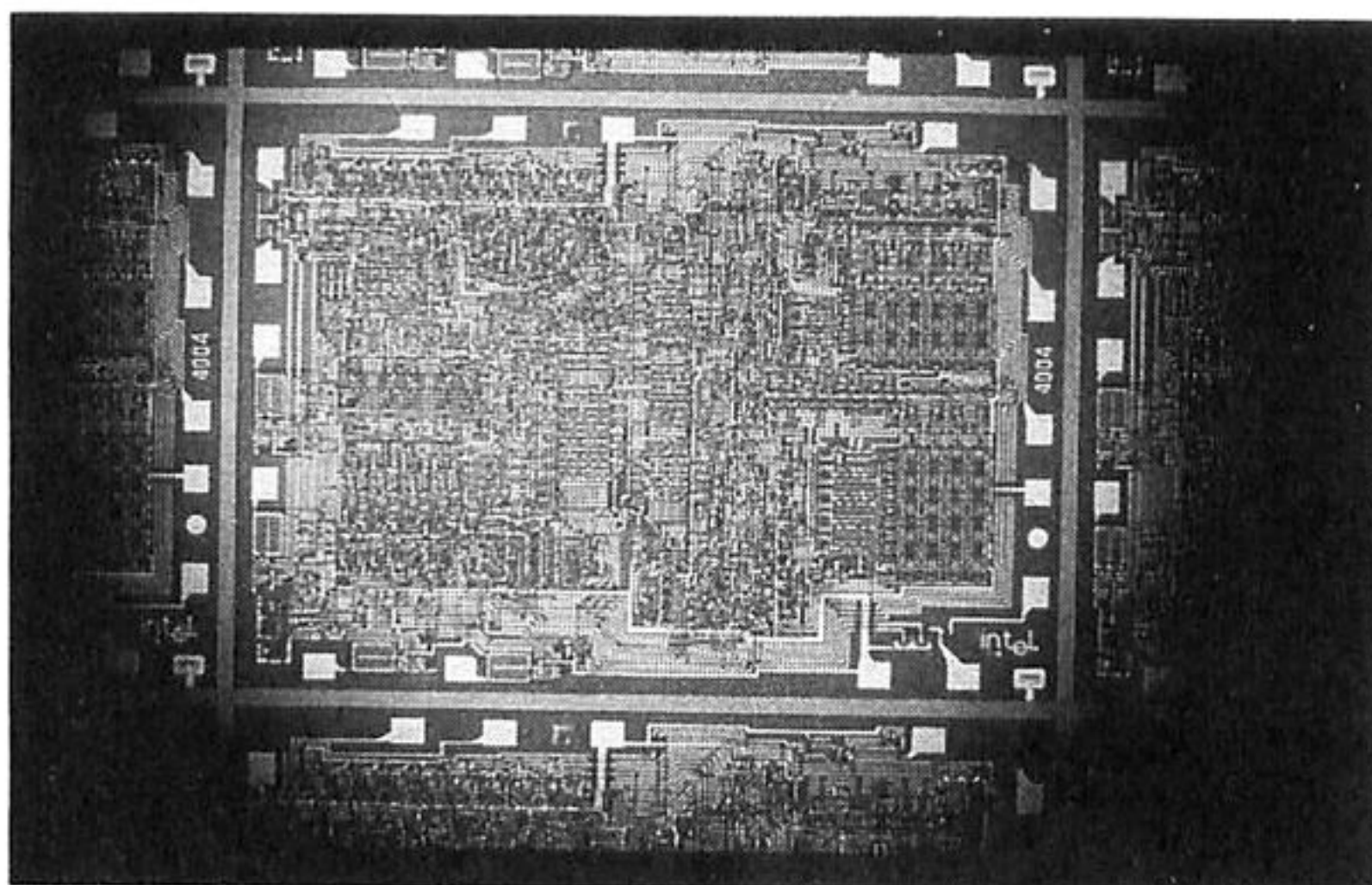



写真3　世界初の4ビットマイクロプロセッサ4004

な方法から、マクロ命令を使ってプログラムを組むことにより論理を実現したストアードプログラム論理方式というソフトウェア的な方法に発展した。そのことを考慮に入れると、よりマイクロなレベルでの命令を使用するマイクロプログラム論理方式は一〇進コンピュータ方式の論理方式より、さらに進んだ次世代の論理方式であると認識された（当時は私が提案したマクロ命令を使用した論理方式との違いを明確にするために、マイクロプログラムと呼んでいた。8086で採用した命令の実行を制御する方式の一つであるマイクロプログラム方式の定義とは異なる）。ただ、私が提案したアイデアでも十分に柔軟性は達成できると予想されたので、未知数のあるアイデアに対しては大変に興味を持てたが、開発日程を考慮に入れると大きな好意は持てなかった。また、開発するチップの種類が減っても、使用する個数は同じなので、当時の非常に高価なメモリを多く使わざるを得ないことが問題の一つであった。さらに、ホッフの提案には電卓や予定していたOA機器にとって致命的な欠陥があった。

制御をソフトウェアで行う

ホッフが示したブロック図には数多くの入出力端子が描かれてあった。それはキーボードと表示のための入出力端子であり、プリンタの制御方法は全く示されていなかった。後はビジコンの仕事だよといった風であった。議論が毎日続いた。演算回路そのものが簡単化されても部分的な解決だと互いに認識した。一〇進データの演算を低コストで実現する方法を初めとして、キーボードや表示やプリン

タなどの入出力制御の問題を解決しなければ議論が先に進まない状況になった。この頃になって、インテル側が実際の論理設計はやりそうもないことがうすうす感じられるようになってきた。結局、仕様の作成と４００４の論理設計は私一人でやることになった。

入出力機器はリアルタイム処理制御が要求され、従来、ハードウェア回路網で組んでいた。その制御をハードウェアからソフトウェアに置き換えることが、果たして可能なのかどうかが非常に大きな問題であり不安であった。また、その問題への解決の糸口は何も提案されなかった。あとでわかったことであるが、ホッフはあくまでもコンサルタントという立場を守って具体的なことはしなかった。リアルタイム制御とは、例えば、プリントしている時にもプリントの制御を止めないで、プリントしながらキーボードからの入力を制御したり、データの表示の制御をしたり、演算が必要であれば演算を実行したりして、システム全体の制御を実時間的に行う方式である。今日のマルチタスク制御が必要とされていた。

六つの問題点

ホッフの最初の提案は非常に基本的なものであり、そのままでは問題が多く電卓の応用には受け入れにくかった。それには次のような問題点があった。第一の問題点は、提案された命令セットがあまりにも基本的なものであり、プログラムサイズが大きくなり過ぎて、プログラムを格納するＲＯＭの数が多くなってコストがかかる。さらに、ソフトウェアで行う入出力機器の制御においても速度が遅す

ぎて、キーボードや表示、プリンタのリアルタイム処理制御が不可能だった。今日のように、非常に速いマイクロプロセッサと大きなROMが使えるような時代ではなく、経済的に使用が可能なROM容量はわずか一Kバイト以下だった。

第二の問題点は、LSIのみによるシステムの構築が不可能であったことである。ホッフの提案では、標準品のROMとRAMをシステムバスを介してアクセスするためのシステムバス・インタフェース用のLSIが必要となってしまい、一〇進コンピュータ方式の汎用LSIの最も重要な目標であったLSIのみによるシステムの構築ができなくなることだった。

第三の問題点は、提案されたプロセッサでは二進データのみの演算命令しかなく、一〇進データ用演算命令がなかったことであった。ホッフの提案は一〇進データと二進データ相互のコード変換を、変換用の表（テーブル）をROMメモリに格納して行う方法だったが、メモリが非常に高かったので実現不可能な提案だった。

第四の問題点は、電卓用プログラムを組みにくかったことである。電卓用のマクロ命令という一種の疑似命令をマイクロな命令で作ることが可能であっても、サブルーチン（繰り返し使うプログラム）としてマクロ命令を使用しようとすると、ROMの容量が非常に増えてしまう。このため、マクロ命令を電卓用の命令と見なして電卓のプログラムをエミュレーション（模擬）する仕掛けを作りだす必要があった。ある特定のレジスタを仮想のプログラムカウンタと

見立てて使う際に、そのエミュレーション機能を助ける命令として、分岐命令にレジスタで指定したアドレスへ分岐する、レジスタ間接アドレス指定方式がなかったことであった。

第五の問題点は、プリンタなどの出力機器と同期を取ったり、リアルタイムで入出力機器を制御する機能や命令が全く提案されていなかったことであった。

第六の問題点は、命令セットそのものだった。小さな問題かもしれないが、トランジスタの数を押さえるために豊富な命令を持たせることは不可能であった。

いろいろの危険性があったが、より良いものに技術者の気持ちは動くもので、アーキテクチャ的には一〇進コンピュータよりも四ビットの二進コンピュータの方が、より大きな柔軟性が期待されると判断し、最終的には、私が応用により適し、性能向上とプログラムステップ数減少と、リアルタイムで入出力機器を制御するための命令と機能の仕様を提案した。この作業に四カ月かかった。

4004の仕様

4004の命令は非常にシンプルに作られている。メモリ空間は電卓を実現するためのプログラム容量が一Kバイトと予想したため、四Kバイトと決められた。命令のアドレス部と主メモリ内のメモリ番地との対応のさせ方であるアドレス指定方式には、分岐命令では命令内に格納してあるアドレスである絶対番地に分岐する直接アドレス指定方式と、レジスタ内に格納してある番地に分岐するレジス

タ間接アドレス指定方式を採用した。データに関しては、直接、レジスタ間接、命令の一部が定数データとして使えるイミディエイト（即値）アドレスなどの指定方式を採用した。その後のマイクロプロセッサと違い、トランジスタ数を増加させないために、メモリアドレスのメモリへの送出にはそれ専用の命令を用意した。メモリに対してロード（読む）命令やストア（書く）命令などで、命令を実行する時に、メモリアドレスを送出しようとすると余分のタイミングが必要となり、論理が複雑になりトランジスタ数が増大する。４００４では、メモリからデータを読む（書く）ときには二つの命令を使う。まず、メモリへアドレスを送る命令。次に、メモリロード（ストア）という命令を使う。ＲＩＳＣプロセッサよりもさらにＲＩＳＣっぽいアーキテクチャであった。

一〇進データの演算のために、二進数一〇進データで加算演算した結果を一〇進データに変換するための一〇進補正命令を設けた。この命令だけでも特許を取っておけば、莫大なお金が入っただろう。と言うのは、その後、ほとんどのマイクロプロセッサにこの一〇進補正命令が採用されたからである。このような何でもない、当たり前のような機能や命令が最も重要な基本的な特許となる。

この当時は、プリンタやキーボードなどの入出力機器からの要求や、他の外界の状況などを受け付ける割り込み制御機能を設けるのは、トラジスタ数の関係で不可能であった。そこで、

外界の状態をセンスするために、特定の入力端子の状態を分岐命令の条件の一つとした。これにより、電卓の応用では、プリンタからの同期信号を入力端子を介して分岐命令を使って判断することが可能となった。また、キーボードをソフトウェアで制御するための一種のコード変換でもある命令も設けた。

キーボードを見ると、縦と横にキーが整然とマトリックス状に配置されている。４００４で発明した方法は、

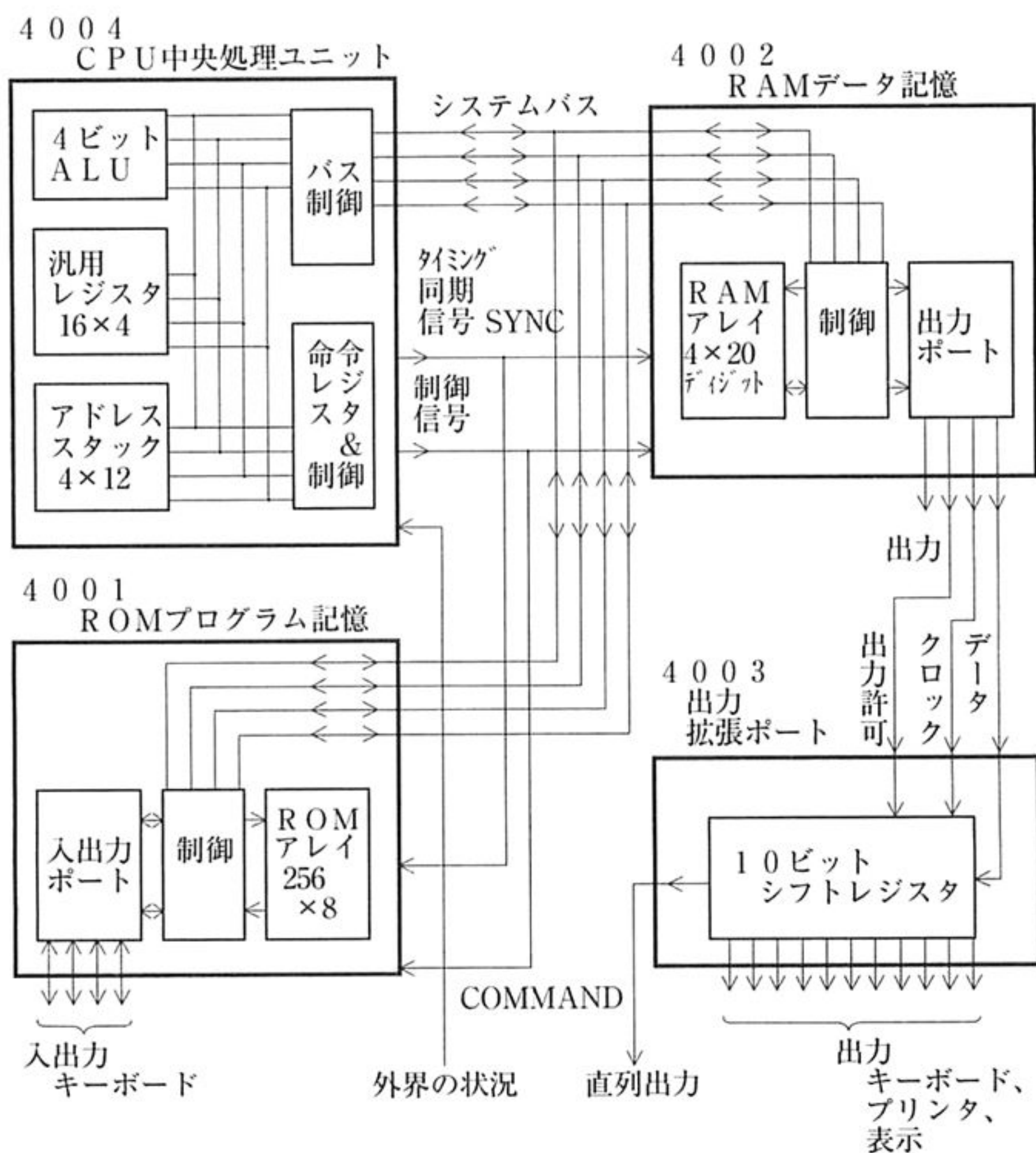



図２－１　世界初の４ビットマイクロプロセッサ４００４のシステム図

４００４システムでは、４ビット幅のシステムバスを時分割して使用しアドレス情報とデータ情報を送ったり受け取ったりしている。

キーボード上のキーが押されているかどうかをソフトウェアで右から左へスキャンしながら調べていき、押されたキーのキーボード上の番地を見つける方法であった。そのプログラムを容易にさせるために、キーボードの縦方向に各々のキーの位置に重さを設け、その重さを見つける命令を考案した。また、汎用レジスタ数が十六セットと少ないので、後述するRAMチップ内にその複製（コピー）があるように仕様を決めた。

4004のシステムバスは四ビットのアドレスとデータを時間分割（タイム・マルチプレックス）して使用したバスである。最初の三つのクロック（時間）で一二ビットのプログラムカウンタに格納してあるアドレスを四ビットずつシステムバスを介してメモリへ送り、次の二クロックで八ビットの命令を二回に分けてメモリから4004へ読み込む、最後の三クロックで命令の実行を行っている。これを八クロック・システムバスと言う。マイクロプロセッサの性能を向上させるために、このクロック数を世代ごとに減少させている。また、4004のトランジスタ数を減少させるために、後述するROMとRAMチップでも同じ命令を読み命令の制御を行っている。例えば、メモリからのデータを4004に読み込む命令では、RAMチップがデータの送出を担当し、4004CPUチップはデータの読み取りだけを担当する。

このように、トランジスタ数を増加させずにいかに応用の要求する機能を盛り込むかが、4004の仕様と論理設計の難しさだった。また、このような新考案を盛り込まないと発明と

いうものは実現できない。紙の上だけでの発明は発明とは言いがたい。

LSIのみによるシステムが最終目標

一〇進コンピュータ方式の汎用LSIにとって、最も重要な目標であったLSI部品のみでシステムを構築するため、プロセッサばかりでなくデータを格納するRAMやプログラムを格納するROM、そして入出力機器用拡張用ポート（入出力端子）にも使えるLSIをファミリーチップとして提案した。開発するマイクロプロセッサを標準品のRAMとROM、それに小規模集積回路TTLとを組み合わせてシステム構築すればよいと思っているインテルを説得するのは大変な仕事だった。

正式な契約に時間がかかるので、いったん日本に帰り、四つのチップの正式な英文のマニュアルと各チップ内の動作とタイミングに関する書類を作成した。英文マニュアルでは誤解を避けるために命令の説明に絵を入れたりした。それが正式なマニュアルに流用されたので4004のマニュアルにはビジコンが作成したマニュアルの一部がそのまま使われている。さらに、インテル側が作っているであろう論理回路のチェック用にチップ内部の動作を詳細に記述し、実際の電卓用プログラムも作成した。

明けて一九七〇年四月に正式契約が結ばれ、新たな開発者としてファジンがプロジェクトマネジャーとして、私の二回目の渡米の一週間前に入社した。インテルを訪問してみると、論理設計者がなかなか見つからなかったようであった。コンピュータ技術者から見れば四ビットで

は物足りなかったのだろう。発注者が仕様や機能やチップ内部の動作を教えなければ仕事がスタートできないとは、冗談ごとではなかった。そのうえ論理設計をやってくれである。思わず怒ってしまった。しかたなしに、私が４００４マイクロプロセッサの論理設計、ＲＡＭ（４００２）とＲＯＭ（４００１）内の命令実行に関する論理設計、生産用のテストプログラム作成を担当し、ファジンが回路設計とパターン設計を担当、わずか一年で四つのＬＳＩ全てを開発した。

インテル社の歴史では４００４論理設計者の名前は空白になっている。幸運なことに、学会でも雑誌や技術新聞でも私がやったことになっている。あつかましいが、最初に述べた世界で最初に電子計算機を発明したアタナホフの心情が良くわかる。４００４は、テッド・ホッフと私が、一九六九年六月から十二月にかけて、半年間の苦労で発明したものである。それ以後にプロジェクトに参加した人や事実を証明できない人が発明を主張することがあり、困ったことである。

世界初のマイクロプロセッサ４００４が成功裏に開発された理由に、基本的アイデア自身の素晴らしさもあったが、応用技術、アーキテクチャ、論理、回路それぞれの設計者が非常にうまく仕事の引き継ぎをしたことも成功の理由の第一に挙げられる。

マイクロプロセッサ・ビジネスの確立

第2節 8080のアーキテクチャ

第一世代の八ビットマイクロプロセッサ8008は、自分自身でも文章の入力や編集、データの格納などができるインテリジェントターミナル内の、英数文字であるキャラクタの操作だけに特化した機能と命令だけを集積した。そのため、命令セットや性能、機能やシステムバス・インタフェースに多くの問題があり広くは使用されなかった。この第一世代の8008を大幅に改良した第二世代の八ビットマイクロプロセッサ8080を開発するために、一九七二年十一月に再度渡米した。

8080の基本アーキテクチャはファジン、ホッフ、フィーニと私の四人で行った。一九六〇年代後半に開発され、ミニコンのお手本になった一六ビットミニコンPDP11はDEC社による第二世代の傑作機である。これは八つの汎用レジスタを設け、全てのレジスタは加減算や論理、シフトなどの命令全ての演算に使えるアキュムレータ（累算器）としても、メモリへのアドレスポインタとしても使えた。8080は八ビットが命令の単位であるので、命令として二五六の組み合わせしか使えない。そこで、8008で採用したシングルアキュムレータとマルチレジスタ方式（八ビットとして六セット、一六ビットとして三セット）を採用した。そ

れでも命令の組み合わせに使う命令コードを多く使ってしまい、命令の種類やアドレス指定方式の種類にしわ寄せが生じた。しかし、アプリケーションプログラムでは、一つのアキュムレータと六つの汎用レジスタが使えたのでメモリへのアクセスを減少させ、データの移し替えも減少し使いやすい方式であった。

8080では、情報処理機器にも使えるように、メモリの容量を決めるアドレス空間を六四Kバイトに増大させた。一六ビット長データの演算命令を追加することによりプログラムでどのようなアドレス指定も演算により実現できるので、アドレス指定方式は直接とレジスタ間接アドレス指定方式だけを採用した。それ以外のアドレス指定方式が必要であれば一六ビット演算命令で解決できる工夫をした。また、アドレスポインタとしては一つの一六ビットレジスタしか使えないが、命令で他の一六ビットレジスタとの切り替えが高速にできるように仕組んであるので、あたかも二つのアドレスポインタが使えるようになっている。この方式の方が、モトローラが6800で採用した一本のインデックスアドレス方式より柔軟性が高くなる。

次に、多くの入出力機器が接続されると、それらが次々と割り込み機能を介してマイクロプロセッサに要求してくる。低位の割り込みが処理されているときに、高位の割り込み要求があると、いったん処理を中断し、高位の割り込みを処理する。これを多重割り込みという。コンピュータには必須のネスティングが無限大の多重割り込み機能を設けた。4004や8008

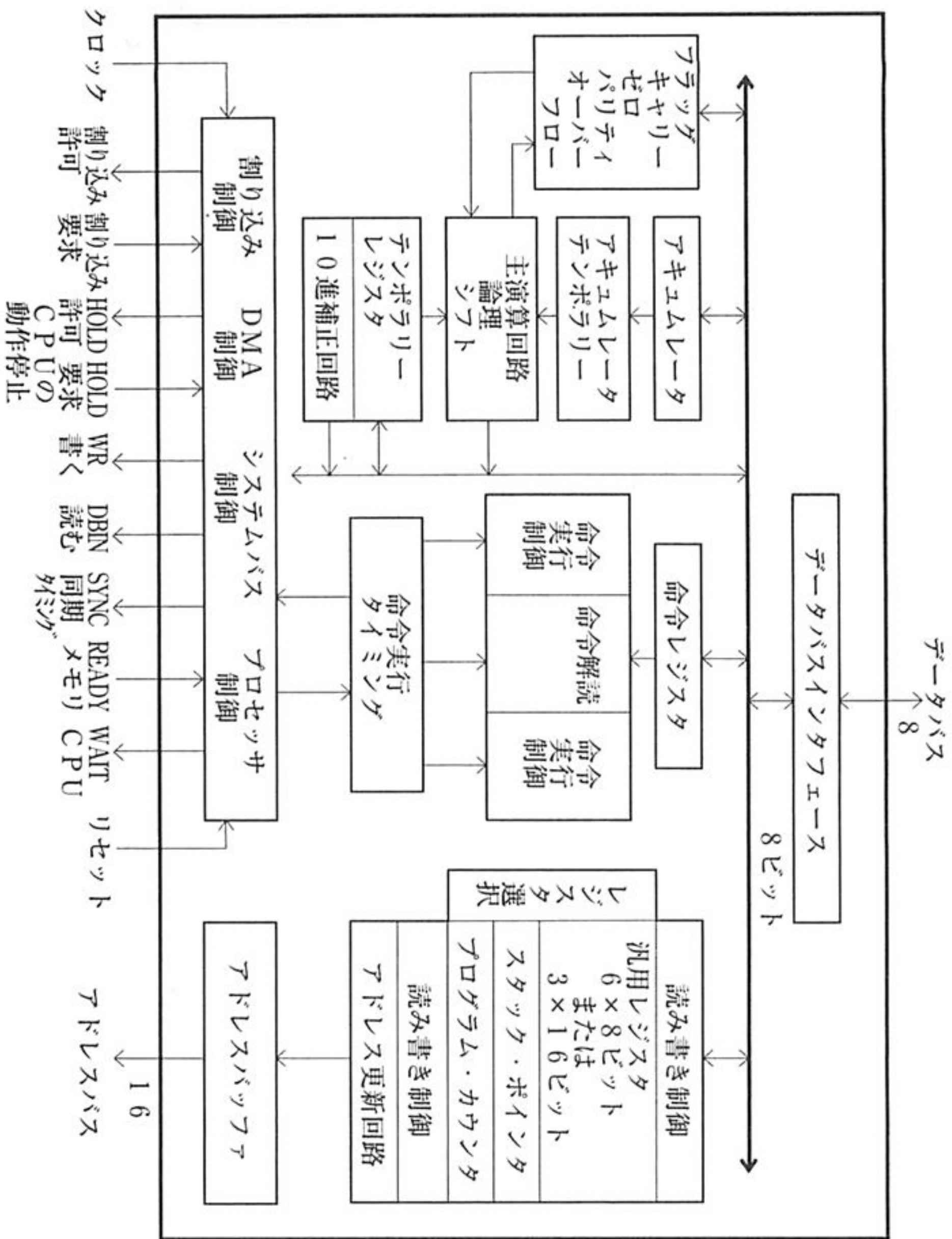



図2−2　8080のブロック図

ではスタックの本数が四本と八本と決められており、サブルーティンの段数や割り込みのネスティングレベルが限定されている。そこで、今までマイクロプロセッサ内に設けていたスタックを外部のメモリに設置できるように、スタックのアドレスを格納する一六ビットのスタックポインタを新設した。

また、マイクロプロセッサを介さずに、直接にメモリ間同士やメモリと高速入出力機器との間での高速データ転送を実現するために、外部装置がシステムバスを占有できるようにＤＭＡ（ダイレクト・メモリ・アクセス）インタフェース機能を設けたり、一〇進補正命令や一六ビットデータ長の命令を含んだ情報処理に適した命令を大幅に追加した。さらに、ユーザーのシステムへの採用を容易にするために、汎用性のある標準システムバスを設けた。システムバスには、一メモリサイクルにクロック数が四つ必要な、四クロック・システムバスが採用された。動作周波数は二ＭHzにした。これらにより、新設の命令がなくても、性能は８００８の四倍となる。実際の性能向上は約八倍であった。あたかも、８００８での不満を一気に解決するようにアーキテクチャが決められた。

８０８０の大成功とマイクロプロセッサ・ビジネスの確立

気がついてみると、私一人でプロジェクトを切り回さなければいけないことになった。翌一九七三年一月二日にパターン設計を開始するために、論理設計と回路設計をわずか二カ月で準備しなければならなかった。そ

れと平行して英語でマニュアルを書くのは、地獄で三途の川を前にして閻魔さんの前で仕事をしているようなものだった。信じられないだろうが本当の話である。一九七三年八月九日のプロジェクト終了までの九カ月、論理と回路とパターンの設計を平行して無我夢中で行った。8080の命令アーキテクチャを決めるときに情報処理への応用を考えてはいたが、開発者四人のメンタリティはまだ制御機器に重きがあった。

プログラムを主メモリのどこにでも配置できる再配置プログラム（リロケータブル・プログラム）を容易に実現させるためのプログラムカウンタに相対的にアドレスする相対アドレス指定方式を入れるのを忘れてしまった。相対アドレスは必ずしも必要ではなかったが、競争相手から指摘される痛恨のミスであった。

8080が完成し発表されると物凄い反響であった。メモリ以外には興味を示さなかった米国の大企業が続々とインテルを訪問した。ノイス博士がうれしそうに実験室を案内したのが昨日のように思い出される。発表は一九七四年二月、フィラデルフィアで行われたIEEEのISSCC会議でだった。割れんばかりの拍手を受けて物凄く興奮したのを覚えている。

8080の成功により、インテルは初めてマイクロプロセッサの威力を実感したらしく、それまで顧客向けカスタムチップを設計していた五人の技術者を私のグループに配属した。システムレベルでの顧客の問題を解決するシステムソルーション（システムレベルでの解決）を提

案していた私は、ペリフェラルチップと呼ばれる入出力周辺機器制御用チップを容易に設計できるように、ペリフェラル用のシステムバスに関する標準ペリフェラルインタフェース仕様書を作成した。次に、システムの基本を構築するために必要なチップであるシステム・ペリフェラルチップを約一年で完成した。それらには、割り込みコントローラ（割り込み制御）、タイマー（時間管理）、DMAコントローラ（高速データ転送）、シリアル通信コントローラ（キーボード、マウス、モデム、ペン用ディジタイザー）、パラレル入出力ポート（プリンタ用セントロニクス）であった。これらがIBM社のパソコンThePCに使われ、システム・ペリフェラルチップの標準品となったため、今もまだ新しいIBMパソコンに使われている。

マイクロプロセッサの開発者から見ると、インテルはどちらかと言うとマーケティングに強い会社であり、一方、モトローラは基礎的な研究から開発をスタートする会社である。マイクロプロセッサの仕様を決めるときに三つの重要な点がある。内部のレジスタ構成、命令セット、アドレス指定方式である。

モトローラ社のMC6800の開発と石油ショック

MC6800は、第一世代のミニコンを改良した雰囲気を持つアーキテクチャであった。メモリ空間は六四Kバイトであり、八ビット長のアキュムレータを一本から二本に増設し、アドレスポインタとして使える一六ビット長のインデックスレジスタを一本用意した。インデックスレジスタが二本あれば完璧だった。6800のアドレス指定方式の特徴はプログラムの再配

置ができるリロケータブルプログラムを実現させる相対アドレス指定方式にあった。分岐命令ではプログラムカウンタに対して相対的に分岐できる相対アドレス指定方式を採用し、データに対してはインデックスアドレス指定方式を採用した。内部レジスタが少ないので、わかりやすい命令コードを組むことが可能となり、ユーザーが命令の組み合わせを理解しやすかった。

内部レジスタの少なさをカバーするために、主メモリ内の〇〜二五五番地のメモリへ高速にかつ少ないプログラム量でアクセスできる工夫が施されている。また、ビットやバイトのデータをテストする命令や、符号付二進データを符号を付けたままシフトするアリスメティックシフト命令が用意されており、よりコンピュータらしく仕様が決められた。さらに、８０８０によるシステム構築時における弱みであるマスク不可割り込み（ＮＭＩ：ノン・マスカブル・インタラプト）機能が用意された。プログラムが時間的に重要な作業をしているときには、外部の割り込みを禁止する必要がある。それをマスク可能割り込みと言う。マスク不可割り込み機能は電源異常などのシステムでの異常事態をマイクロプロセッサに割り込みで知らせるための機能である。

ＭＣ６８００は８０８０と十分対抗できるマイクロプロセッサであった。どちらにも長所と短所があった。ＭＣ６８００にとって残念なことに、開発のスケジュールが世の中の動きと同期がとれていなかったことである。一九七三年の時点では、石油ショックがすぐ目の前に来て

いるとは誰も思わなかった。一九七四年末に石油ショックが米国の株式市場を襲い、株価が大暴落した。インテルの株も七五ドルから一五ドルへと大暴落した。毎日毎日、あれよあれよという間に、株価が下がった。自分の財産が目の前で消えていくのである。半導体も氷の時代に入った。

幸運なことに、インテルではシステム・ペリフェラルチップの開発が順調に進み、ゴールがすぐ間近かであった。一方、モトローラではＭＣ６８００が完成したばかりで、ペリフェラルの開発は大分先の話となってしまった。この遅れが８０８０に絶対的な有利の状況を与えてしまい、８０８０がデファクトスタンダード（事実上の業界標準品）となった。ペリフェラルチップの価格も安くなり、オペレーティングシステム（ＯＳ）やＢＡＳＩＣなどの言語や開発支援機器なども急速に完備され、マイクロプロセッサ本体の仕様だけでは採用の可否が決められない時代に入った。ＩＢＭがパソコンＴｈｅＰＣの構想を練ったときに、モトローラ系マイクロプロセッサは候補にも上がらなかった。どんな素晴らしい製品でも、開発スケジュールが世の中の動きに適合しなければ大きな成功は見られなく、さらに次への展開の機会も失ってしまう。

一九七四年後半に入ると、フェアチャイルド社がF8という二個のチップでシステムが組めるマイクロプロセッサを開発した。今で言うワンチップマイコンの二チップ版である。インテルはF8に過剰反応してしまった。「8080の成功は高性能コンピューティングパワーのシステムユーザーへの提供によりもたらされた」ことを忘れてしまい、8080に続く次世代八ビットマイクロプロセッサにより高い性能を持たせることよりも、高集積化路線を築こうとする傾向を見せはじめた。その基本方針により開発されたのが8085であったのだが、開発の遅れと強力な競争者となったZ80の前に新しい命令を発表もできずに敗退してしまった。その高集積化路線に反発して高性能版を開発しようと運動していたファジンとアンガマンがインテルを飛び出し新会社ザイログを設立した。

気が弱くなったインテル

DOSシステムを目指したZ80

一九七二年頃になるとフロッピーディスクと四KビットのDRAMの二つの重要な技術が市場に登場して、ディスク・オペレーティング・システム（DOS）が可能となった。応用分野が制御機器からデータプロセッシング（情報処理）機器へと着実に広がる傾向が見えた。ファジンとアンガマンが設立した会社に私も一九七五年二月に加わった。石油会社のエクソン社が融資して会社の名前もザイログ社（Zilog）と名付けられた。情報処理の新たな応用分野へ入るべく、DOSシステム

を目指して、8080の改良版である八ビットマイクロプロセッサZ80を開発、一九七六年三月に完了した。Z80の開発の難しさは、インテルの知的財産権を避けて、いかに8080と異なるように設計するかであった。

Z80は初期のパソコンやゲーム、高速プリンタなどに大量に使用された。Z80は8080と命令レベルでの互換性を保ち、データプロセッシングに適した強力な命令の追加、高性能、低消費電力、システムインタフェースの容易さ、低価格などによって大きな市場を獲得した。また、フロッピーディスクとメモリとの間のデータ転送にも使え、DMAチップよりも高いデータ転送レートを実現できるブロック転送命令や、DRAMメモリのリフレッシュ制御が簡単に実現できるDRAMリフレッシュ制御機能などの応用に適した機能も集積した。Z80は8080系マイクロプロセッサの決定版となった。

情報処理分野に入るべく、Z80は、相対アドレス指定方式や二本のインデックスレジスタを新設し、インデックスアドレス指定方式を新たに採用した。この二本のインデックスレジスタは非常に使いやすく8086にも使われた。さらに、命令セットとして、ビット操作命令の新設、一六ビット演算命令とシフト/ローテイト命令の充実、ブロック転送命令やメモリ内の文字や文字列を見つけ出すメモリサーチ命令などの新設、などがあった。8080と命令レベルでの互換性を持ったZ80の仕様は、8080の市場での優位性と、モトローラの6800

の機能の優位性と、それぞれの弱さと、近未来におけるデータプロセッシングに適した命令と機能、などを基にして決められたといっても過言ではない。悪口を言う人はZ80を評して、ありとあらゆる物をごった煮したマイクロプロセッサ、と評価した。まさに、その通りであった。そして、ありとあらゆる応用で大量に使われ、今でも年数千万個と大量に使われている。

Z80まではチップのパターンに著作権が認められず、一文も支払われずに日本の半導体会社に自由にコピー(複製)された。マイクロプロセッサにもリバースエンジニアリングが始まったのである。名前は何となく技術的な雰囲気があるが、実態は盗作そのものである。歯がゆいというよりは、泥棒にあったと同じで、米国の半導体業界の苛立ちは物凄いものであった。8080では写真で撮ったようなコピーで、Z80ではオリジナルのZ80を横に広げたワイド画面のようなコピーであった。

一九七四年頃の日本では既に開発技術は持っていた。ソフトウェアの互換性だけ守れば何の障害もなかったのにと今でも思っている。面白いことに、その会社からZ80にクレームが来た。命令の増設方法についてであった。折り返し、電卓で使った方法だと返答したらもう何も言ってこなかった。その後、日本はオリジナルな開発がいかに重要かを8086で思い知らされる。今はマルチメディアの時代だと言われるが、一九六〇年代と同じく最先端技術を米国に頼っているのが現状である。

第3節 ビジネス用パーソナルコンピュータの登場

一六ビットマイクロプロセッサの出現

マイクロプロセッサが多くの応用分野に採用され始めると、より高性能とより大きなメモリ空間の要求が出現してきて、インテルの8086やザイログのZ8000などの一六ビットマイクロプロセッサが開発された。一六ビットマイクロプロセッサの最大の課題は六四Kバイト以上のメモリ空間をいかに実現するかであった。二番目の課題は命令語長をバイト単位で行うのかワード（二バイト）単位で行うかであった。三番目の課題はアドレス指定方式を含む命令セットだった。そして、複雑になるであろう命令をどのような論理方式で実現するかも問題の一つであった。また、前世代のマイクロプロセッサとの互換性をいかに保持するか、さらに、高級言語やOSやマルチプロセッサをサポートするためにどのような命令や機能を搭載するかも重要な課題であった。マイクロプロセッサがいよいよコンピュータらしくなる時代である。

8086は一九七五年に開発をスタートし、一九七八年前半に完成した。一方、Z8000は一九七六年七月に開発をスタートとし、一九七八年後半に完成した。一六KビットDRAMが量産体制に入った時期であり、六四KビットDRAMの量産は一九八〇年以降と予想された。

一九七五～六年当時では、大きなメモリが必要なグラフィックス機器へのマイクロプロセッサの応用は時期が早すぎると判断された。情報処理分野においても、まだテキスト（文字）ベースのアプリケーションがほとんどであった。これらの理由により、メモリ空間の拡張にはプログラムやデータを六四Kバイトの大きさで一つの論理的なブロック（単位）として取り扱うセグメント方式が採用された。セグメントとは長いプログラムやデータを短い単位の系列に分割することで、プログラムはプログラミングを簡単に行うためにいくつかのセグメントに分割される。そのセグメント情報を格納するのがセグメントレジスタである。すなわち、命令（コード）とデータに一本ずつのセグメントレジスタを割り当てれば九五％の応用で問題がないと予想された。

この頃、それまでの電子工学出身の論理・回路設計者に代わって、コンピュータサイエンス（情報処理工学）出身の技術者が一六ビットマイクロプロセッサのアーキテクチャの開発を担当するようになった。また、ＩＢＭ社やアムドール社の技術者が半導体会社に入ってきた。したがって、ＩＢＭのアーキテクチャからの影響が皆無とは言えなかった。それで、８０８６とＺ８０００は共にセグメント方式を採用した。

８０８６は内部に四本のセグメントレジスタを設置し、コード（命令：プログラム）に一本、スタックに一本、データに二本割り当てた。セグメントレジスタ内の一六ビットのアドレスを

左に四ビットシフトして二〇ビットのアドレスを生成し、次に命令で指示されたアドレス指定方式に基づいて計算された一六ビットの実行アドレスを前述の二〇ビットのアドレスに加算して二〇ビットの物理アドレスを生成し、一Mバイトのアドレス空間を実現した。

一方、Z8000はマイクロプロセッサ内部の論理アドレスが二三ビットあり、上位の七ビットをセグメントレジスタを選択するアドレスとして使い、外部のメモリを管理するメモリ管理ユニット(MMU)に設置した百二十八本の二四ビットのベースアドレス(開始アドレス)を格納しているセグメントレジスタを使ってアドレス変換をし、二四ビットのアドレスにプロセッサからの一六ビットのアドレスを加算して一六Mバイトのアドレス空間を実現した。したがって、高価なメモリを効率よく使うために、マイクロプロセッサからのアドレス(論理アドレス)を、搭載している主メモリのアドレス(物理アドレス)にマッピングする機能があるので、小さな主メモリを使って大きなプログラムを実行できる工夫が盛り込まれていた。柔軟性とメモリ管理や保護さらにオペレーティングシステムの組みやすさではZ8000の方が優れていた。

互換性を重視しすぎた8086

二番目の課題である命令語長で8086は深刻な問題に直面した。性能の点において8085では豊富な命令を追加したZ80には勝負できないことが明白となった。そこで、8086は一六ビットデータ長のアー

キテクチャを保ちつつ、８０８０との互換性を持たせる必要に迫られた。８０８０との命令のバイナリ（機械語）互換を放棄し、再アセンブルする必要のあるソースプログラムでの互換性を保つことが決まった。

まず、命令語長をバイト単位で増加させるバイト可変長方式を採用し、命令の高効率を実現した。次に、さらに高密度な命令コードを実現するために、内部の汎用レジスタ数を８０８０と互換が保てる八本に抑えた。また、Ｚ８０と同じくインデックスアドレス指定方式を採用するために、二本のインデックスレジスタが設けられた。さらに、８０８５で試みたが公開しなかった高級言語をサポートするためのフレームポインタ用レジスタを新設した。しかし、命令コードに余裕がなくなって、三二ビット長データ向け命令にはほとんど命令コードを予約しなかった。このことが将来の三二ビット機で問題となった。さらに、Ｚ８０の対抗機として外部システムバスのデータ幅を一六ビットから八ビットに変更した８０８８マイクロプロセッサの開発も予定に入れた。ただし、これらの決定はＺ８０に勝つための特効薬にはならなかった。

８０８６は市場に出てＮＣ（数値制御）装置などの高速制御機器に採用されたものの、Ｚ８０００やモトローラ社のＭＣ６８０００が登場すると、８０８６のマーケットは浸食された。ところが、インテルにとって幸運、実に幸運なことに、Ｚ８０の対抗機として開発された８０８８が、ＩＢＭがＴｈｅＰＣパソコンの開発に当たって、社内的な問題で八ビットの外部

データバスを選択しなければならなかった時、最大の救世主となった。逆にZ8000は制御機器分野に押し込められてしまった。

論理方式に8086はマイクロコードを使用した。マイクロプログラム論理方式を採用することにより、ソフトウェアの一種であるマイクロコードを知的財産権として保護することが可能となった。8086の命令よりも、さらに一段下のマイクロ命令を作成し、マイクロ命令を使ってプログラム（マイクロコード）を組み、8086命令を実現した。このマイクロプログラム論理方式の採用により、データバスを八ビット長に変更した8088が短期間に開発された。

グラフィックスへの応用

一九七七年頃からグラフィックスへの応用が検討された。この動きをモトローラ社はじっと見ていた。一九七七年に入ってもパターン設計はなかなか始まらなかった。ついにモトローラは決断を下した。モトローラのMC68000は豊富で制限の少ない十六本の三二ビット汎用レジスタと三二ビットのリニア・メモリ・アドレスを採用した。パッケージの端子数の制限により物理アドレス空間はZ8000と同じく一六メガバイトにした。一六セットのレジスタ群の内の八本をアドレスポインタ用レジスタに割り当て、残りの八本のレジスタをデータ用に割り当てた。ここでも八本の汎用レジスタを搭載したPDP11のアーキテクチャが参考にされている。三二ビットのリニ

ア・メモリ・アドレスはグラフィックスに最適な方式であった。
アドレス指定方式には、8086と同じく、ロードアドレス命令を採用すると同時に、直接、レジスタ間接、ベースレジスタ、インデックス、ベースインデックス、イミディエイトのアドレス指定方式を設け、さらに、その後の多くのマイクロプロセッサに搭載されたポストインクリメントとプリデクリメントのアドレス指定方式を採用した。また、分岐命令に関してはプログラムカウンタに対しての相対アドレスのみならず、さらに、プログラムカウンタをインデックスレジスタで修飾するアドレス指定方式も追加した。
ポストインクリメントは、レジスタ間接アドレス指定方式を使ってメモリへアクセスし、その終了後に使用したアドレスポインタ用のレジスタに「一」を加算しアドレスの更新を行うアドレス指定方式で、その源は、やはりPDP11だった。プリデクリメントはメモリへのアクセスの前に、アドレスポインタ用のレジスタから「一」を減算しアドレスの更新を行うアドレス指定方式である。両方とも、連続したデータ列を処理するときに有効な命令である。ブロック転送命令やストリング命令はそれよりもさらに高性能が発揮できる命令と解釈すればよい。
命令に関しては、MC68000は、8086やZ8000が提供するブロック転送の一種であるデータストリング命令やアスキーコード補正命令を採用しなかったが、ビット操作命令や高級言語向け命令、アドレス領域テスト命令やタスクスイッチ時間を短縮する命令など

8086には見られない命令を設けたりして、一九八〇年代に必要な命令セットを準備した。その後、データストリング命令は必須であると判断され、命令コードの予約と定義がなされた。

Z8000と同じく、そして8086とは違って、MC68000はOSをサポートする機能を採用した。アプリケーションプログラムが、OSの領域にアクセスしようとしたり、OSが制御すべき入出力機能を使用しようとしたり、OSの環境を変更しようとしたりする場合に、その動作からOSを保護しないとシステムが破壊されてしまうことがある。それらの保護機能をサポートするために、Z8000と同じく、MC68000にもスーパーバイザーモードとユーザーモードが用意されている。

例えば、スーパーバイザーモードはオペレーティングシステムの本体に使われ、メモリやファイルや入出力の管理を行い、ユーザーモードはアプリケーションプログラムに使われる。したがって、それぞれが使うスタックのためのスタックポインタが別々に用意されており、ユーザーモードでは入出命令やシステムに影響を与える命令（特権命令という）や機能は使用禁止にされている。

Z8000は乗算や除算命令を含む強力な各種の三二ビット長データ用演算命令を搭載したが、アドレスそのものがリニアでなかったため三二ビットマイクロプロセッサとは言えなかった。しかし、MC68000は一六ビット・データバス版三二ビットマイクロプロセッサと言

って差し支えないだろう。総合的に判断すると、命令アーキテクチャではZ8000とMC68000はほぼ同等レベル、ただしリニアアドレスを採用したMC68000はグラフィックス時代には最適で、8086は一段低いランクに位置づけられる。

MC68000は、アーキテクチャ的には最も強力で柔軟性があり、UNIXとUNIXのオペレーティングシステムでつちかわれた高級言語であるC言語にも最適である。MC68000が正式に市場に出たのは一九八〇年で、市場に入るのが遅すぎた。以後、モトローラのマイクロプロセッサはIBMパソコンの開発タイミングと常に一年のギャップが生じてしまった。

一度は時機を逸したMC68000

この頃から、製品が完成しないうちに学会で発表する風潮が始まった。実際にはバグがあるので、製品として出荷されるのは一年以上先の話になってしまったのが、その頃のマイクロプロセッサ開発の難しさだった。

一九八〇年に入るとグラフィックス機能が必須となり、システムに優先して搭載する時代が始まった。MC68000は、一九八一年に初期のアポロ社のドメイン・シリーズDN―100に、また一九八二年にはサンのSUN―1に、ワークステーションのメインプロセッサとして採用された。一九八四年にはアップルのマッキントッシュにも採用されて量的な成功を収めた。

パソコンとワークステーション以外の応用において、この時代までのマイクロプロセッサは、

主としてROMを使用したプログラム埋め込み型の、今で言うEmbedded（埋め込み式）コントローラとして利用された。主な使用言語はアセンブラであり、データレジスタとしてもアドレスポインタとしても、制限なく使用できる豊富な数のレジスタと命令の組み合わせが、高性能化やプログラミングの容易化のために非常に重要視された。すなわち、「初めに命令とレジスタありき、命令とレジスタが全てである」である。広範囲の応用問題を、応用に適した豊富な命令による、命令アーキテクチャで解決したのが、CISC（Complexed Instruction Set Computer）型マイクロプロセッサであった。

IBMパソコンに8088が採用されて全てが変わった

一九八〇年に入ると、パソコンビジネスを誕生させ成長させたアップルIIの弱みが浮き彫りになった。アップルは、個人を対象にしたビジネスで大成功したが、膨大なユーザーであるビジネス層をターゲットにした顧客獲得の動きをしていなかった。さらに、アップルIIが提供するオペレーティングシステム（OS）、メモリ容量、データ処理能力、外部記憶装置、モニタなどは業務用ソフトウェアのプラットフォームとしては受け入れにくかった。

一九八一年八月十二日に、IBMは、膨大なビジネス層をターゲットに置き、開発期間短縮と低コスト実現のために、周辺ボードやソフトウェアのメーカーに特許使用料を請求しない「オープンアーキテクチャ」と「既製標準品の使用」を開発とビジネスの基本におき、パソコ

ンThePCを市場に登場させた。
ThePCは一六Kバイトのメモリと一六〇Kバイトのフロッピーディスクを一台搭載し、価格は千五百九十五ドルで、重量は九・四kgだった。拡張スロットは五つあり、メモリ増設、CRTインタフェース、プリンタインタフェース、モデムなどのシリアルインタフェース用RS―232C、五インチ・フロッピーディスクインタフェースなどに使われるように計画されていた。
マイクロプロセッサはインテルの8086ファミリーが選ばれた。ただし、一六ビットという高性能マイクロプロセッサは、IBMの他の事業部が取り扱っているディスプレイライター(ワープロ)などの高性能で高価格なオフィス機器に使用されていたので、社内的に反発されないように8086とソフトウェアが互換で八ビットの外部データバスを持つ動作周波数が四・七七MHzの8088がパソコンに搭載された。
IBMの開発グループにとって最も重要な課題は、一年以内に製品を市場に出すこととコストであった。正式に開発の許可が下りる前では、一時的にZ80が試作品に使われていた。Z80の六四Kバイトのメモリ空間ではビジネス用アプリケーションには適さず、MC68000はサンプルが出たばかりなので検討対象からはずされ、結局8080とソースプログラムで互換性がある8086が選択された。また、8080で開発されたペリフェラルチッ

プが安かったこともマイクロプロセッサ選択の重要な鍵であった。ＩＢＭ産業デザイン部からの反対にあったが、開発期間を縮めるために、パソコンの箱にプラスチックの代わりに板金を使用した。さらに、コスト削減のために社内入札制度も導入した。今までのＩＢＭでは考えられないやり方だった。このようにして、コスト削減と同時に開発期間を二年以上も短縮できた。

一方、インテルは「ＩＢＭはインテルにとって引き入れたい最も大きなクライアントである」と判断し、パソコン向けキットとして破格の低価格をＩＢＭに提示した。パソコンに搭載する言語は評判の高いマイクロソフトのベーシック（ＢＡＳＩＣ）言語に決まった。

ところが、思わぬところでつまずいてしまった。オペレーティングシステムとして当時最も評価の高かった、ＣＰ／Ｍを持つディジタル・リサーチ社が話に乗ってこなかったのである。一九八〇年八月、パソコンのプロジェトにゴーサインが出され、ＩＢＭパソコンＴｈｅＰＣはチェス計画のエイコンプロジェクトとして正式にスタートした。

ＩＢＭはマイクロソフトに、ベーシック言語の契約に当たって、一六ビットのパソコンの図面を示しつつ、ことのついでにオペレーティングシステムはどの社にするかは決まっていないと付け加えた。マイクロソフトに幸福の女神が微笑んだ一瞬だった。当時ＳＣＰ／ＤＯＳと名付けられた８０８６用のオペレーティングシステムを開発していたシアトル・コンピュータ・プロダクトという会社があった。マイクロソフトはその権利を買い取り改造し、ＰＣ－ＤＯＳ

としてＩＢＭに納入した。同時にＭＳ－ＤＯＳとしてマイクロソフトが独自に販売できる道を残した。これが、今日のマイクロソフトの隆盛につながった。何故ＩＢＭが許可したかは不明である。ＩＢＭパソコンの成功により、パソコンビジネスもメインフレームコンピュータの世界と同じく、「はじめにＯＳありき、ＯＳが全てである」となった。パソコンＴｈｅＰＣそのものの機能スペックはアップルⅡの不満を解消する程度ではあったが、オープンアーキテクチャと低価格路線を選択したことにより「デファクトスタンダード」とも言えるパソコンの世界標準機となった。

ＩＢＭが切り開いたビジネス用パソコンＴｈｅＰＣは大成功を収めた。ＩＢＭパソコンは一九八二年の「タイム」誌新年号の表紙を飾った。創刊から五十五年目にして初めて、新年号の表紙を人物ではなくパーソナルコンピュータが飾った。表紙のタイトルは「今年話題の機械」と銘打たれていた。

ＩＢＭパソコンの主流になったＰＣ／ＸＴが一九八三年三月に発表された。四・七七MHzの８０８８を使用し、主メモリ容量を六四Ｋバイト（最大六四〇Ｋバイト）に増大し、五インチ・フロッピーディスクの容量を三六〇Ｋバイトに増大し、二〇Ｍバイトのハードディスクを搭載、ＣＲＴディスプレイはカラーとなり、通信アダプターにより他のＩＢＭコンピュータと接続可能となった。拡張スロットも今日のパソコンと同じ八スロット分用意された。拡張スロ

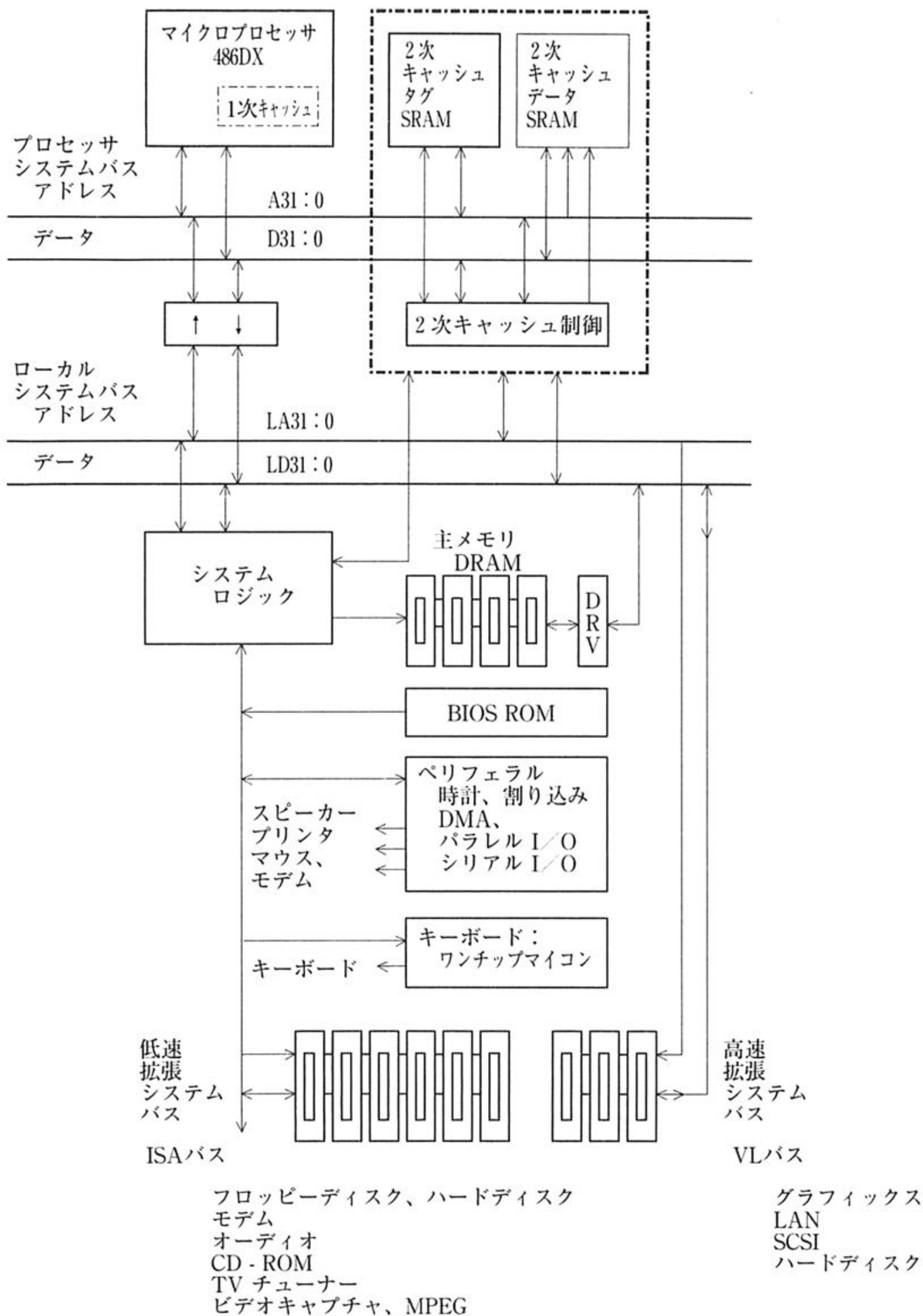



図2－3　IBM系パソコンのシステムブロック図

ットに使用した拡張バスのデータ幅は八ビットであり、現在でもXT拡張バスとして使われている。PC/XT機種により「オープンアーキテクチャ」が本当の意味で達成された。このため、互換パソコンの登場が始まり、パソコンビジネスのインフラが整備された。

一九八一年の売り上げがわずか四千三百万ドルであったIBMのパソコンビジネスは、一九八四年に四十億ドル以上に急成長した。そこで、IBMパソコン互換機(クローン)ビジネスが急成長してきた。一方、I

PC/ATでインテル製マイクロプロセッサが主役に

BMは「複製機キラー」を探していた。一九八四年初頭においては8086そのものの価値はまだ十二分にあり、九・五MHzの8086を使って開発を始めたが、最終的に8086の後継機種である80286がPC/AT機に採用された。使用した80286の動作周波数は六MHzであった。システムの性能はPC/XTを一とすると、8086では二・二倍、80286では二・九六倍となり、80286の採用は8086と比べて、パソコン利用者にはほとんどメリットがなかったが、最終的にIBMの上層部で決められた。

主メモリ容量は五一二Kバイト(最大三Mバイト、後に一六Mバイト)に増大され、五インチ・フロッピーディスクの容量も一・二Mバイトに増大され、最初のATは二〇Mバイトのハードディスクを搭載した。拡張ポートの拡張バスのデータバス幅を一六ビット(ISA拡張バス)に広げると同時に、速度も一Mバイト/秒から五Mバイト/秒へ五倍に上げた。また、キ

ーボードは世間に広く認知されているセレクトリックタイプライタ標準のものを採用した。価格は四千ドルを割った。拡張技術（Advanced Technology）の略ということで、ATと名付けられた。発表は一九八四年八月十四日であった。

ところが、ウェスタン・デジタル社製のハードディスク制御ボードに使用されていたテキサス・インスツルメント社製チップに欠陥があり、ハードディスクのデータが突然破壊される事態が生じた。ATの価格や市場導入の方ばかりに気を取られていたので、普段している平行購買のチェックを忘れてしまったのである。そして、IBMは慎重になりすぎて、ATの量産出荷を九カ月引き延ばしてしまった。この出荷遅延によって、半導体不況と重なり、インテルは窮地に追い込まれた。そこで、インテルは多くの会社に286セカンドソース権を売ったり、技術交換契約を結んだりした。だが後年、386でビジネスが急速に回復したときに、問題が生じた。特にAMD社との間で起きた、チップパターン図やマイクロコードの使用権に関する技術交換契約の問題が大きかった。

一九八五年に入ると、九・五MHzの8086を使ったXT互換機を台湾などのクローンメーカー（複製機メーカー）が非常に安い価格で出荷し出した。また、80286を使ったより性能の高いAT複製機がコンパックから販売された。IBMより二五％速く動き、価格は一〇％割安だった。コンパックはIBMよりも高い性能を提供することと、ほぼ同価格という戦略を

うちたてた。ＩＢＭと同価格で販売したのはコンパックが初めてだった。

真の三二ビットマイクロプロセッサ３８６

一九八五年に発売された３８６は、単にメモリ保護ができる８０２８６と違って、ページング機能を含んだメモリ管理機能が強化された、真の三二ビットマイクロプロセッサだった。３８６では、まず、少ない主メモリで大きなプログラムを処理するために、仮想記憶方式が導入された。主メモリに入りきれないプログラムはハードディスクに格納されている。次に、悪評高かった六四Ｋバイトの境界を四Ｇバイトへと拡張し、さらに、メモリに対して二種類のマッピング方式、従来のセグメント方式とページング方式を導入した。６８０００と同様に、三二ビットのリニア・メモリ・アドレスで四Ｇバイトのメモリに自由にアクセスすることが可能となった。

３８６の仮想記憶方式を利用すると、四六ビットの仮想アドレスが使え、五一二Ｍバイトのハードディスクの十二万倍以上の大きさのアドレス空間が使える。ページング方式では、仮想記憶はページと呼ばれる四Ｋバイトの大きさに分割されて、プログラムの実行に必要なページがハードディスクから主メモリへと呼び込まれる。その際の、仮想アドレスを主メモリへのアドレスである物理アドレスにマッピングする方式をページングと言う。

このように、３８６は２８６と異なりコンピュータとほぼ同格の機能を有するようになった。

ＩＢＭが新世代の三二ビットマイクロプロセッサの本当の使い方を考え、３８６の採用に躊躇

していたときに、コンパックは386を使って、いち早く三二ビットパソコンとして一九八六年末に売り出し大成功した。また、ユーザーは三二ビットパソコンという名前で将来性があると思って買ってしまった。実際は、ただ単に速いだけの一六ビットのパソコンだったのだが。

MS―DOSパソコンの最大の欠点は、ウィンドウズ上の主要アプリケーションが一六ビットしかサポートしていないことである。三二ビットのパソコンは速度の向上と将来のアプリケーションソフトウェアの出現を促進するプラットフォーム作りにしか貢献していない。いわば、三二ビットの虚像のスクリーン上にウィンドウズで窓を開け一六ビットの実像を結ぶようなものであった。その当時の一六MHz版三二ビットパソコンは、ウィンドウズ3・0が登場した一九九〇年になると、ジャンクのような性能的に使えないただの鉄の箱になってしまった。パソコンユーザーは大きな声でOSとアプリケーションソフトウェアと半導体の会社に言うべきである。「速いだけじゃ嫌だ」と。

パソコンの生産台数は一九八五年に約一千万台に達した。いったん、80286がIBMパソコンに採用され互換パソコンが台頭し出すと、性能と価格の競争がより激しくなった。パソコンのデファクトスタンダードが決まると、パソコンの販売はパソコンの性能そのものに左右されるようになり、パソコンの主役はパソコンメーカーからマイクロプロセッサメーカーへと移った。一九八五年に半導体不況により苦境にあえいでいたインテルは、386のパソコン市

場における大成功により、神風が吹いたように、他の業界よりいち早く生き返った。

ハードディスクとCD－ROMとDRAMの低価格

ハードディスクが初めてIBMパソコンに搭載されたときの容量は、わずか二〇Mバイト、そしてDRAMの一チップ当たりの容量はわずか一六Kビットだった。一九九四年においてウィンドウズ搭載のパソコンを快適にそしてわがままに使うには五〇〇Mバイト以上のハードディスクと一六Mバイトの主メモリを搭載することが望ましい。今日、ハードディスクの価格は一〇〇Mバイト当たり一万円以下となり、DRAMは一六Mビットチップが使えるようになり、CD－ROM機器も数万円で買える時代になっている。

今、世の中はウィンドウズ時代であると言われている。ウィンドウズの提供するGUI(Graphical User Interface)と言うヒューマンインタフェースは素晴らしく、直観的でわかりやすく、今で言う「人に優しい」、パソコンへの命令伝達方法である。ウィンドウズ３・１の次機種であるウィンドウズ95で初めて、十一年前に開発したマッキントッシュの提供するウインドウ機能レベルに近づく。マッキントッシュの失敗はGUIにわかりやすい名前を付けなかったことである。

GUIは、それまでのキーボードからのコマンドによるパソコンへの命令伝達方法から、マウスを使って画面上に出ている絵（アイコン）を指示（クリック）することによる命令伝達方

法へ進展させた、画期的な技術であった。GUI技術は一朝一夕に誕生した技術ではなかった。

GUIの誕生

一九六八年秋、サンフランシスコのシビックセンターで開かれた「コンピュータ合同会議」で、世界初のウィンドウシステムが発表された。キーボードの他にマウスを持ち、互いが重ならないマルチプルなウィンドウ画面にテキストが表示されていた。システムは、国防総省の先端技術研究計画局（ARPA）からの資金援助によって、スタンフォード研究センターというシンクタンクのエンゲルバードによって開発された。そのウィンドウから見える文章、数字、グラフ、イメージなどがある空間が「情報空間」である。SF作家のウィリアム・ギブソンによって「サイバースペース」と呼び名が付けられた。エンゲルバードによるウィンドウやマウスの開発目的は「人類が持っている処理能力を超えてしまった、蓄積された知識に対処するための知性の強化拡大」であった。すなわち、人間の編集能力であり処理能力の増幅であった。

一九七〇年、ゼロックス社は「未来のオフィス」の開発のために、スタンフォード大学に近いパロアルト市にパロアルト研究センター（PARC）を設立し、非常に多くのコンピュータサイエンスの研究者を集めた。エンゲルバードの下で働いていた大部分の研究者もPARCに移った。

重要なこととして、これまでのテキストをベースにした表示と異なり、紙とインクで書いた

文字と同じ品質の表示を求め、「ビットマップ」を使ったグラフィックス機能を導入し、かつ、画面上に表示されるものと同一品質を持った高品質な印刷をプリンタですることにより、WYSIWYG（What You See is What You Get）機能も実現した。今日のウィンドウの原型がPARCでほとんど開発された。ゼロックス社の主力事業である印刷の品質へのこだわりが、WYSIWYG機能を誕生させた。ゼロックスはこの開発した技術を使ってシステムStarを作り、売り出した。価格は一万八千ドルで、あまりの高さに誰も買わなかった。失敗の原因は二つあり、ゼロックスがシステムの販売方法を知らなかったことと、Starを作った開発者のメンタリティが研究にあったことである。アイデアを製品にして、世に送り出し、ビジネスを始める意思が皆無だった。

マッキントッシュの誕生

一九七九年十二月、アップル社のスティーブ・ジョブズは、ゼロックスからの出資の見返りにPARCの訪問を許された。ジョブズはStarの前進であるAltoのデモを見て、パソコンの世界は変わると感じた。アップルは直ちにモトローラのMC68000を使ってリサの開発に着手した。ゼロックスは秘密を盗まれたとやっと気がついたが遅かった。アイデアを一度見れば後は実現方法だけが問題となるからだ。アップルの計画したウィンドウがStarと大きく異なるところは、メニュー方式の代わりに直接作業ができるダイレクトマニピュレーション（直接操作）方式を開発し

たことだった。この方式の採用によりウィンドウもアイコンも直接ドラッグすることが可能となった。
一九八三年三月、リサは発表された。ところが、リサの販売成績はさんざんだった。リサは主メモリを一Mバイトも必要とし、性能を保つために当時非常に高価だったハードディスクを搭載せざるをえなくなり、性能が良くないのに価格が一万二千ドルを越えてしまった。さらに、アプリケーションソフトウェアも自社で開発しようとした。アップルIIで採用した「ライトウェイトカー」と「オープンシステムズ」の思想を忘れてしまった。
一九八四年一月二十四日、社内の少数グループが「ライトウェイトカー」の思想を忘れずに開発していた、ディスプレイ一体型のマッキントッシュが二千五百ドルの価格で売り出された。最初のころの売れ行きは良かったが、マッキントッシュの四つの欠点が表面化した。一台のフロッピーディスク、一二八Kバイトの小容量メモリ、ハードディスクの欠落、拡張ポートの欠落、などであった。マッキントッシュは一九八四年には二十五万台しか売れなかった。
しかし、とうとう女神がマッキントッシュに微笑んだ。一九八五年七月二十五日、アルダス社がDTP（デスクトップ・パブリッシング）用アプリケーションソフトウェア「ページメーカー」を売り出し、電子出版が始まったのである。マッキントッシュは一九八七年に発表したマックIIで「オープンシステムズ」の思想に立ち返って成功した。

マイクロソフトのウィンドウズ

マイクロソフトのＧＵＩへの挑戦は一九八三年に始まり、ウィンドウズ（Ｗｉｎｄｏｗｓ）と名付けられた。一九九〇年に発表したウインドウズ３・０で初めて使える機能になった。ロボットのような非人間性的なキーボードからのコマンドによる操作を要求するＤＯＳと比較すると、格段に優れてはいるが、マッキントッシュと比較すると、ヒューマンインタフェースとは言えない半世代前の機能で、ウィンドウが開いてアイコンが使えるのが取りえである。ところが、ＤＯＳの非人間的な操作にへきえきしていたユーザーはウィンドウズに直ちに移行した。発売以来、三年間で三千五百万本も売れた。一九九五年に出荷予定のウィンドウズ95の機能はマッキントッシュとほぼ同等と予想されている。ＩＢＭパソコンにも本格的なウィンドウが実現される。

ただし、ユーザーの立場から見ると、マイクロソフトのウィンドウズは文字をベースにした文化であり、一方、アップルのマッキントッシュのシステム７は画面であっても文章であっても、絵をベースにした文化である。真のＷＹＳＩＷＹＧとは、画面の全体であれ部分であれ自由に拡大縮小し、そのままのサイズで印刷できる機能のはずである。したがって、ウィンドウズを使ったワープロソフトでは文字の大きさや形が自由に選べても、マッキントッシュのように画面全体や一部を自由に拡大縮小できないのが、パソコンを知的道具として使うユーザーには不満である。

マイクロプロセッサを離れ、長々とウィンドウについて述べた。ウィンドウを使ったGUIを「人間の編集能力と処理能力を増幅しつつ知性の強化拡大」のために使うには、高性能なマイクロプロセッサ、大容量のメモリ、大容量のハードディスク、プログラムとデータベース用CD—ROMなどが必須となる。

三十分以上席に着いていなくてはならなかったアプリケーションソフトウェアのインストールはCD—ROMの採用によりマウスのクリックだけで終了するようになる。性能の悪いマイクロプロセッサを使っては生産性向上は全く望めないし、大容量のメモリなしのマルチタスクは生産性に優先権をおく知的作業では考えられない。また、ディスク容量を気にしながらする作業にも、高く知的な仕事は考えられない。これらの必須なもののインフラが整備され低価格化されて初めて、ウィンドウを使ったGUIがより現実味を帯びてくる。また、後述する、真っ白な紙に、文字、絵、グラフ、映像、音声などを使って、人間の感性に訴えることができるデジタル書類を作成するアプリケーション間連携機能も必須となる。それらの必須条件を満たさないシステムは、一〇〇〇ccの車で、一四〇キロのスピードで、エアコンを回して、五人家族で、乗鞍岳を登るようなものだ。

一九九五年にマイクロソフトのウィンドウズ95が予定通り出荷されると、ウィンドウの勝負はマイクロプロセッサの性能そのものに移行する。マッキントッシュにも採用されたIBMの

PowerPCの成功が鍵となる。

第4節 ワークステーションの登場と発展

CISC型プロセッサを使用したワークステーションの登場

一九七〇年代後半、CADで代表される技術的な分野では、DEC社の傑作ミニコンVAXに強力なグラフィックスターミナルとネットワークを搭載したシステムが全盛時代を築いていた。決して使いにくいシステムではなく、端末機を通して高価な処理能力とメモリなどの資源を共用してコスト削減に効果を発揮した。

ただ、システム一台の値段が二百万ドルもし、しかも性能の関係で、一台のVAXに三～四台のグラフィックスターミナルしか接続できなかった。開発を主体にする会社にとってはコスト的に大きな重圧であった。また、VAXシステムはいわゆるコンピュータ部門が管理していたため、技術者がシステムを自由に使うことは不可能であった。

当時のパワーユーザーの希望は、高性能プロセッサ、大きなメモリ容量、高い画面表示能力、高速ネットワーク、大容量ハードディスクであった。一九八一年、アポロ社がモトローラ社の

ＭＣ６８０００を使ったドメインシリーズＤＮ—１００を発表した。アポロは今まであったネットワーク化されたミニコンをベースにしたワークステーションと区別するために、ハイパフォーマンス・エンジニアリングワークステーションと宣伝した。価格は最も安いミニコンの三分の一の六万ドルで発売された。直ちに、ＣＡＤアプリケーションをビジネスにして急成長していたメンターグラフィックス社とコンピュータ・ビジョン社が採用した。アポロの欠点は、他社との互換性のない自社開発したイージスＯＳとドメインＬＡＮを採用したことである。

オープンシステムズ・ネットワークの勝利

一九八二年に入ると、サン・マイクロシステムズ社が、ＩＢＭの「オープンアーキテクチャ」と「既製標準部品の採用」の基本方針に「ネットワーク」を足した「オープンシステムズ・ネットワーク」構想に基づいたＳＵＮ—１を発表した。価格はアポロの三分の一の二万ドルであった。その二年前、ＣＡＤ専門会社デイジー社はＩＢＭ社のＰＣ／ＡＴを改造したシステムに、自社開発のマルチタスク用ＯＳと半導体向けアプリケーションソフトウェアを搭載して成功した。サンは、その経験により、標準品を使えば半年以内にシステムが組めることを確信してＳＵＮ—１のハードウェアシステムをわずか三カ月で開発した。

マイクロプロセッサにはアポロと同じくモトローラの一六ビットマイクロプロセッサＭＣ６８０００、高速システムバスにはマルチバスまたはＶＭＥバス、低速ペリフェラルバスはＩ

BMパソコン用ISAバス、LANはイーサーネット、OSにはカリフォルニア大学で改良されたUNIX4・2などが選ばれた。アポロの欠点は全てクリアされた。

UNIXの導入は大成功であった。UNIXの所有権は開発したAT&T社が握っていたが、UNIXの技術を広めたのはサンであった。大学でUNIXを学んだ学生が会社に入り、多くのUNIXベースのアプリケーションソフトウェアを開発した。サンはその後ワークステーションでは初めてウィンドウ機能も導入した。サンの初期の頃の成功は、一三〜一四%という低い収益率と、ウィンドウの導入と、UNIXについている評判の高いC言語の無料配付と、プロセッサアーキテクチャの公開、などでもたらされた。

一九八八年になるとアプリケーションソフトウェアの本数はアポロの六倍となった。さらに、いったんアポロに決まったコンピュータ・ビジョンとの契約を破格値のSUN—2で挽回した。一九八六年に発表したSUN—3はモトローラの68020を使って二MIPSの性能を達成している。一方、アポロのDN—3000の性能は一・二MIPSだった。この後、アポロには大きな成長は見られなくなった。アポロの失敗は前に述べたように、自社開発したOSとLANであった。「オープンシステムズ」を導入しなかったために、最初の頃の成長を維持できなかったのである。一九八七年におけるUNIXをベースにしたアプリケーションソフトウェアの本数はアポロの三倍になった。一九八九年にアポロはHPに買収され企業としての終わり

を告げた。
一九八九年に６８０３０を使って、ＳＵＮ―４は一〇ＭＩＰＳの性能に到達した。ＤＥＣのＶＡＸ８８００（ＤＥＣステーション３１００）の性能はＭＩＰＳ社のＲＩＳＣプロセッサＲ２０００を使って動作周波数一六MHzで一四ＭＩＰＳを達成している。ＳＵＮシリーズはついにＶＡＸという名前の付いたミニコンに追いつくまでに成長した。しかし、ＣＩＳＣプロセッサの性能の進展にかげりが出つつあった。

発展の鍵は高性能プロセッサの採用

ワークステーションは非常に高性能が要求される応用分野に使用された。ただ、パソコンと異なり、「初めに応用ソフトウェアありき、応用ソフトウェアが全てである」であった。ワークステーション業界においては、価値ある応用ソフトウェアが最も重要なビジネスの要因であって、プロセッサはその価値ある応用ソフトウェアを高速に実行させて高性能をパワーユーザーに提供する手段として位置づけられた。
ワークステーションの価格が下がるにつれ、マーケットはソフトウェア開発やビジネスなどの分野にも広がり、大量生産とパソコンより高性能であることがサンの重要なビジネスの鍵となった。
サンは、より高い性能を求めてＲＩＳＣ型プロセッサを導入した。すなわち、ワークステー

ションにおける高性能化への諸問題をパイプライン制御技術と、コンパイラ技術に最適化された命令アーキテクチャで解決したのがＲＩＳＣ（Reduced Instruction Set Computer）プロセッサであった。コンパイラとは、人間にわかりやすいC言語などの高級言語で書かれたプログラムを、プロセッサが実行できる機械語で処理できるプログラムに翻訳するルーチンである。

ＲＩＳＣプロセッサを最初に導入したシステムは一九八九年に発表されたＳＰＡＲＣステーションで、一二・五ＭＩＰＳの性能で価格は七千ドルだった。一九八七年に開発されたＳＰＡＲＣプロセッサは富士通のゲートアレイを使って一七MHzの動作周波数を達成した。一九八七年では、必ずしもＣＩＳＣプロセッサより速くはなかったが、次に一九八九年に開発に成功したＳＰＡＲＣ―ＣＹは４８６と同じ二五MHzの動作周波数で二倍の三〇ＭＩＰＳ以上の性能を実現した。とうとう、ＲＩＳＣプロセッサがＣＩＳＣプロセッサを超えた。この時点で、ＲＩＳＣプロセッサに切り換えたことはサンにとって大きな成功であった。

ＩＢＭパソコンが「オープンアーキテクチャ」の採用により世界標準機になると、パソコンの指導権はパソコン自体からＯＳとマイクロプロセッサに移行した。サンはＳＰＡＲＣアーキテクチャを公開して数社からプロセッサを購入したが、サンの中で最も高性能なＲＩＳＣプロセッサであるＳｕｐｅｒ―ＳＰＡＲＣは自社で開発し、プロセッサの指導権は手放さなかった。陳腐化したプロセッサを使ったシステムにはパワーユーザーは見向きもしなかった。特に、技

術系のアプリケーションではソフトウェアの値段がプロセッサの性能とリンクしているので、プロセッサボードだけ安くなっても魅力はない。

一方、一歩出遅れたMIPS社は、サンより五〇%以上速いRISCプロセッサで対抗する基本方針で、R2000、R3000、R4000シリーズを開発した。しかし、米国のシリコングラフィックス社と日本のユーザー以外に大きなシステムユーザーをまだ獲得していない。MIPSの一世代前のRISCプロセッサR3000がソニー社のゲーム機プレイステーションに使われている。

超高性能ワークステーションの出現

IBMのPC/ATパソコンとサンのワークステーションのビジネスは、大量販売と大量生産に目標を置いている。大量販売や大量生産とは違ったマーケットを目標としたのがヒューレット・パッカード（HP）とIBMである。超高性能ワークステーションを開発して高価格で高付加価値なマーケットを狙ったのである。HPはプレシジョン・アーキテクチャ（Presition Architecture）に基づいた、RISCプロセッサであるPA7100プロセッサシリーズを開発した。一方、IBMはパワーアーキテクチャ（POWER Architecture）に基づいた、RISCプロセッサであるPOWERプロセッサを開発した。このPOWERプロセッサがPowerPCプロセッサに発展していった。

超高性能ワークステーション用プロセッサの特徴である、性能に対する基本的方針は、常にサンのマイクロプロセッサと比較して、整数命令では二倍以上、浮動小数点命令では三倍以上の性能をユーザーに提供することであった。また、DECも六四ビットRISCプロセッサAlphaシリーズを開発してこのマーケットに参加した。さらに、競争が激化し、DECが21164、サンがUltraSPARC、IBMがPowerPC620、MIPSがR10000、HPがPA8000、などを開発している。この超高性能のゴールを達成するためにコンピュータと半導体のありとあらゆる技術が導入されている。詳細は第4章第4節で述べる。

第3章

マイクロプロセッサの技術的将来展望

第1節

マイクロプロセッサの発展と技術的要素

性能と進化を決める技術的要因の関係

一九六九年に世界初のマイクロプロセッサ４００４が発明されて以来、マイクロプロセッサは、より使い易いアーキテクチャと、より高い性能を目指して発展してきた。マイクロプロセッサの性能は、ある仕事の処理を実行した時の純然たるその仕事のための処理時間、で比較され、処理時間は通常下記のように表される。

処理時間＝クロックサイクル×ＣＰＩ×命令ステップ数

マイクロプロセッサは右辺の三つの要因を減らすべく急速に進化してきた。クロックサイクルを減らすことは動作周波数を向上させることである。CPI（Cycle Per Instruction；命令の平均実行クロック数）の減少は論理構成方式、特にパイプライン制御技術や命令の並列処理技術であるスーパースカラ技術によりなされる。プログラムの命令ステップ数の減少は命令セットのアーキテクチャとコンパイラの改良によりなされている。

CISCであれRISCであれ、性能向上のためには応用に特化した命令を追加している。ところで、アーキテクチャと論理構成方式の進展は論理量、すなわち総トランジスタ数により決められ、動作周波数は半導体プロセスの性能、回路技術とパイプライン技術によって決められ、チップ面積は使用する総トランジスタ数と半導体プロセスにより決まる。

性能と製造コストのトレードオフ

高性能マイクロプロセッサには高付加価値が期待できたので、新世代のマイクロプロセッサを開発する時には、ウェーハー段階での収率が三〇～四〇％になるようにチップ面積を想定して仕様が決められた。収率が決まれば、マーフィー氏の収率モデル（Murpy's Probe Yield Model）によりチップ面

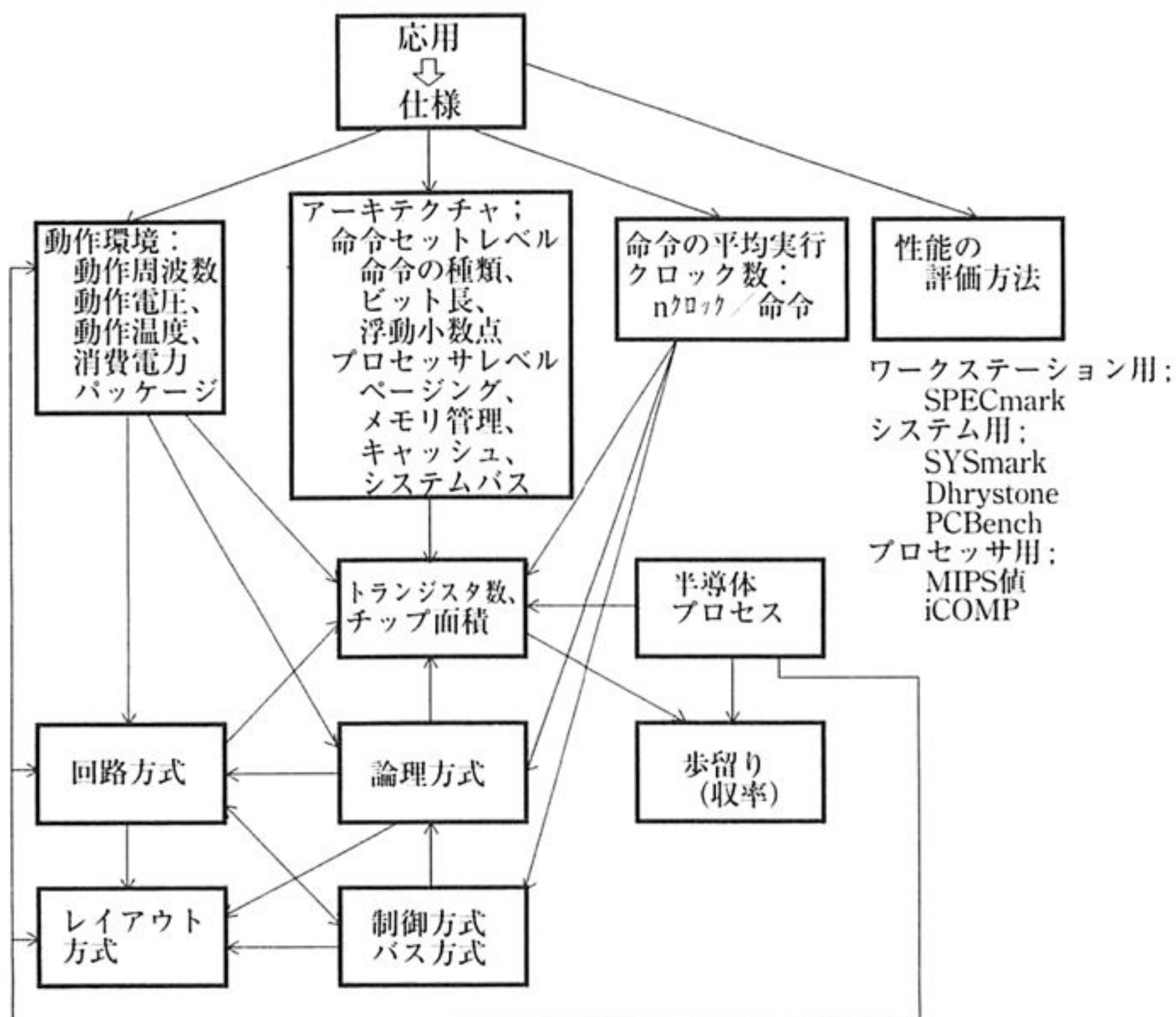



図3－1　マイクロプロセッサの性能と進化を決める要因の関係

積が計算され、集積可能なトランジスタ数が算出される。8080を開発した一九七三年頃では、使用可能なトランジスタ数は五千以下であり、チップ面積が一〇%増大すると収率が三%下がりチップコストが一〇%以上増大した。

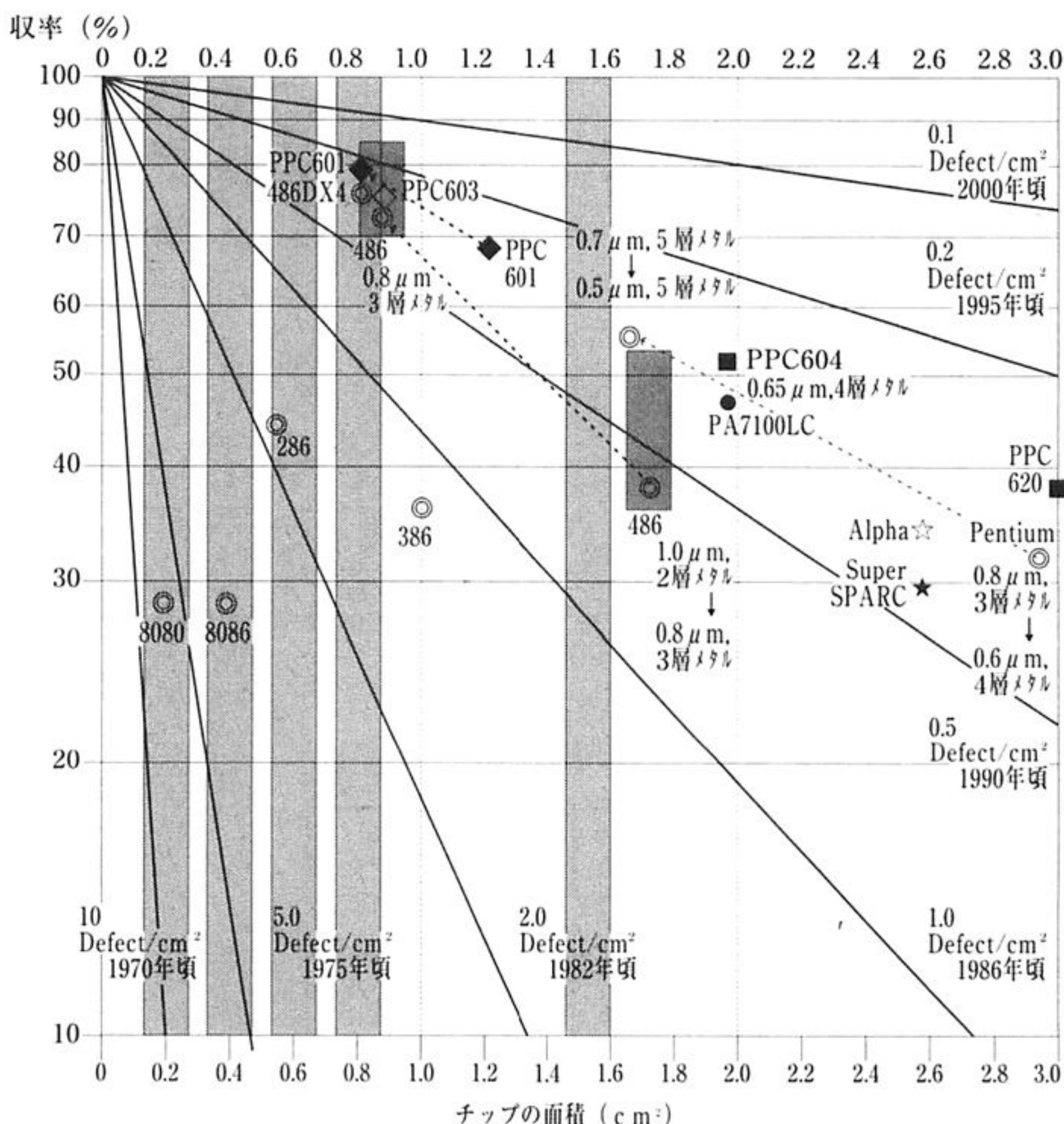
仕様を決めるに当たって論理やパターン設計を考慮しなかったり、計画性のないパターン設計を行ったりすると、

注：収率に影響を与える欠陥密度（Defect/cm²）は半導体メーカーや半導体プロセスの成熟度によって2～4年の差がある。4層のメタルやBiCMOS（PentiumとSuperSPARC）を使っている場合は、2～4年前の欠陥密度に補正すると、収率の値の正確さが増す。

図3－2　マイクロプロセッサのウェーハーソート時の収率

チップ面積は二〇％ほど増大してしまう。したがって、当時のマイクロプロセッサの開発とは、応用分野の要求を満たしつつ、機能（仕様）、論理方式、論理量（トランジスタ数）、回路方式、レイアウト、消費電力、設計機器、開発期間、開発人数との間での最適化設計を行うことであったとも言える。正式に量産体制に移行させるときになっても、マイクロプロセッサのテスト（試験）に使う、起こりそうな入力の組み合わせの

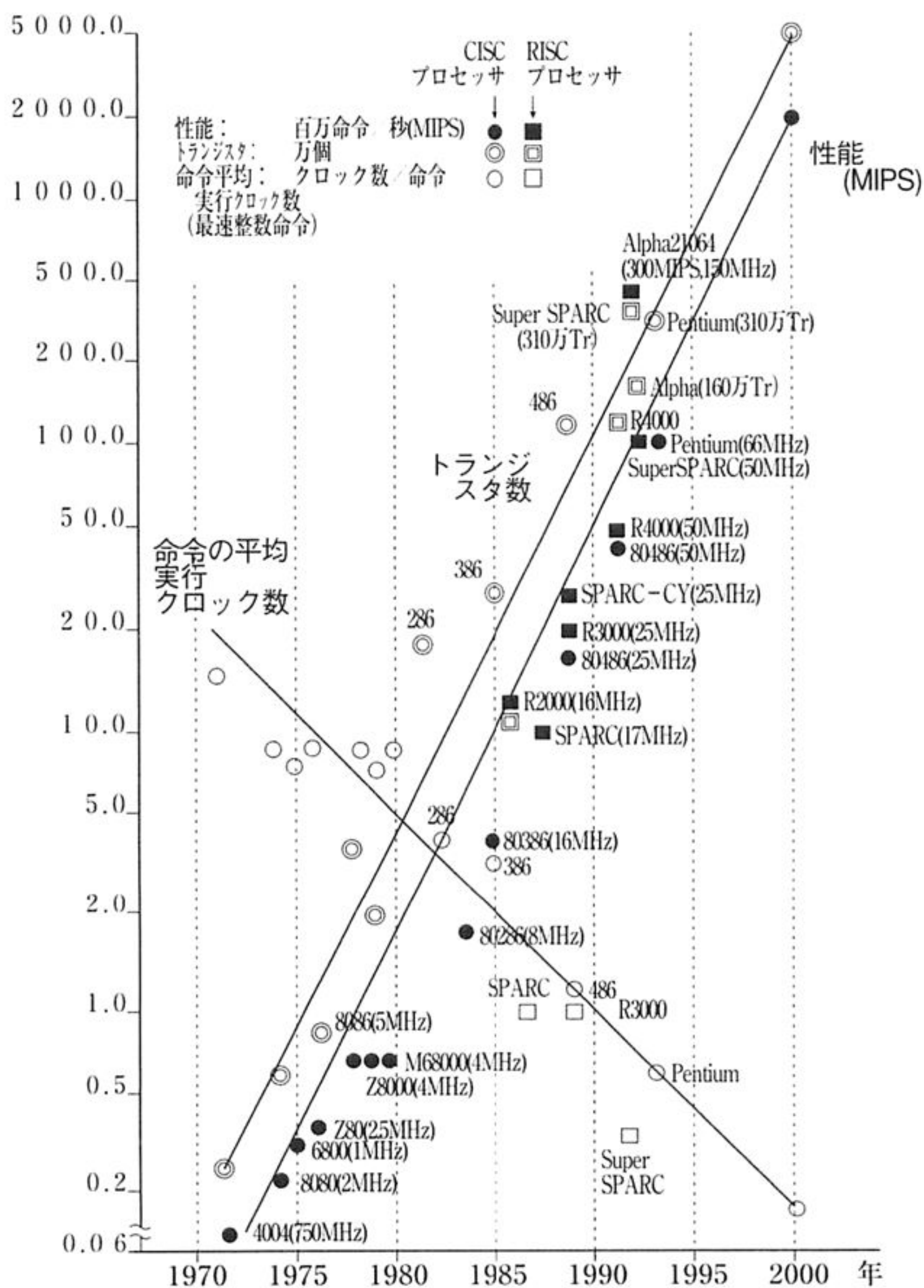



図３－３　マイクロプロセッサの発展

標本データであるテストパターン（ベクター）に不備があって予想した収率が得られないことが多い。

ただし、超高性能マイクロプロセッサでは性能が重要視されるので、コストや消費電力は二の次にされる。ただ、量産体制に入ると、一般的に、より高い収率を得るために次世代の半導体プロセスに変更して二倍の収率を得ている。

性能とトランジスタ数、命令実行クロック数の進化

半導体プロセスは約三年に一回進化しており、トランジスタの性能向上とともに、トランジスタや配線における実装密度が約五六％ずつ改良されている。使用するマスクや半導体プロセスに起因する欠陥密度（Defect Density；一平方センチ当たりの欠陥数）も五年間で約二倍ずつ改善され続けている。したがって、新世代半導体プロセスを使用する時には、約四〇％の収率を保ちつつ、前世代の半導体プロセスの使用時と比較して、約一・六倍（有効面積では二倍）のチップ面積に、約三倍のトランジスタを集積化することが一般的となり、今日に続いている。

ＣＩＳＣプロセッサは４００４の時代からペンティアムの時代までの二十二年間に約三年に一回ずつ七世代分進化している。命令の平均実行クロック数による性能がほぼ同一であれば、ビット長が八ビットから一六ビット（８０８０やＺ８０から８０８６やＺ８０００）、また一六ビットから三二ビット（８０２８６から８０３８６）へと進化した時や、同一ビット長で命

令の平均実行クロック数の減少によって性能を倍に上げるために（80386から80486）、シリコン面積は一・八～二・二倍増大した。すなわち、三年に一回ずつ新世代のマイクロプロセッサを開発するためには、命令のアーキテクチャの進化か命令の実行クロック数による性能の進化かのどちらか一つの選択が必要であった。

初期の三二ビットCISCプロセッサ80386では、複雑なメモリ管理機能やページング機能を同一チップ内に集積したため、使用可能なトランジスタ数の制限により、最も速い命令でも一六ビットマイクロプロセッサ80286と同じく二つのクロック分の時間を使わざるを得なかった。同一動作周波数では、RISCプロセッサと比較して半分の性能しか達成できなかった。このことがCISCプロセッサとRISCプロセッサの性能の論争を引き起こした原因の一つでもあった。

インテル系のX86シリーズの命令アーキテクチャの進化は三二ビットマイクロプロセッサ386で停止した。386の後継機種である486もペンティアムも命令的には386と全く同じである。異なる点は二次キャッシュメモリの制御やマルチプロセッサ制御に関してだけである。したがって、使用するトランジスタは内部の一次キャッシュの大容量化と実行クロック数の減少による性能向上にのみ使われている。

実行クロック数を大幅に減少させるために、命令の並列処理制御技術である、複数本のパイ

プライン構造を持つ複数の実行ユニットを内蔵したスーパースカラ技術が導入されている。整数命令を実行するユニットの数は、ペンティアムで二個、PowerPC620で三個、SuperSPARCで三個、UltraSPARCで三個使われている。

生産可能なチップ面積と動作周波数の増大

チップ面積と動作周波数は、半導体プロセスの進化に合わせて年々大きく、そして速くなっている。一九九二年には〇・八ミクロンルールの半導体プロセスを使用し、ウェーハー製造段階での歩留りである収率を四〇%と仮定すると、一五・五ミリ角のチップ（三百万トランジスタ）が製造可能となった。一九九五年には〇・五ミクロンルール半導体プロセスを使って二センチ角のチップ（七百万トランジスタ）が出現し、二〇〇〇年には〇・二五ミクロンルール半導体プロセスを使って二・八センチ角のチップ（五千万トランジスタ）が出現すると予測される。

一方、動作周波数の進展を見てみると、4004では七五〇KHzの動作周波数を使用した。すなわち、一九七〇年代にAM波で出発したマイクロプロセッサは、一九九〇年代前半にFM波の領域に達し、西暦二〇〇〇年には五〇〇Hz以上のVHF波の領域に達すると予測される。

第2節

RISC型プロセッサの出現と発展

RISC型プロセッサは高性能化へのアプローチの一手段

マイクロプロセッサは、一九六九年に発明されて以来、諸々の改良を導入することにより、より高い性能を実現してきた。まず、一〇進データ演算命令、ビット演算命令、乗除算命令、ブロック転送のようにブロック単位でデータ列を処理するストリング命令などの比較的複雑な機能とか、豊富なアドレス指定方式とか、浮動小数点用演算命令のような性能が重要視される機能を命令レベルにおいてハードウェアで実現した。

次に、コンパイラが生成するオブジェクトプログラムが速く動くように、かつコンパイラがコンパイルし易いように命令セットアーキテクチャの追加がなされた。さらに、オペレーティングシステム（OS）をサポートするメモリ管理、保護機能、タスク制御や例外処理などの非常に複雑な機能がマイクロプログラム技術によりROM（マイクロROMともいう）にファームウェア化された。ファームウェアとはROMなどのハードウェアに内蔵されたソフトウェアである。

このようにしてDECのVAXシリーズや80X86や680X0のような複雑な命令体系

を持ったＣＩＳＣプロセッサが発展した。性能をＭＩＰＳ値で単純に比較すると、性能は過去二十二年間で約千六百倍向上した。ただし、データ長を含めた命令セットの発展を考慮に入れると、一万倍以上の性能の向上が達成された。そのうち動作周波数による性能向上は百三十三倍であるが、命令の平均実行クロック数の減少による性能向上はペンティアムのような二命令が同時に実行される命令の並列処理技術であるスーパースカラ技術を使っても、わずか十六倍にしかすぎない。

やがて一九七〇年代後半に入ると、コンピュータ業界では後述するパイプライン制御技術が開発され、高級言語が普及すると同時にコストパフォーマンスがより強調されるようになった。その要求を満たすべく、ハードウェア機能を簡単化しかつ汎用化し、高級言語で書かれたプログラムをコンパイルした後のオブジェクトプログラムをパイプライン制御により高速に実行するマイクロプロセッサの誕生が期待されるようになった。すなわち、ＲＩＳＣプロセッサの登場である。

ＲＩＳＣへの道

ＲＩＳＣ型プロセッサは高性能化への一つの手段であり、その本来の概念は一サイクル当たり一命令の割合で実行できる非常に高速なクロックサイクル（高動作周波数）のマシンを作り出すことであった。したがって、アーキテクチャに対して六つの基本的な要求がある。

①命令は一サイクル（クロック）で実行。②パイプラインの実現性に適していること。パイプラインの各ステージがそこを通過するどの命令に対しても、ほぼ同種の操作を行う。ある操作だけが膨大な論理を必要とすると、それが性能向上へのボトルネックになるおそれがある。③コンパイラに最適化された命令体系と命令の実現方法。④メインメモリ操作はメモリからデータ転送を行うロード（LOAD）命令とメモリへのデータ転送を行うストア（STOR

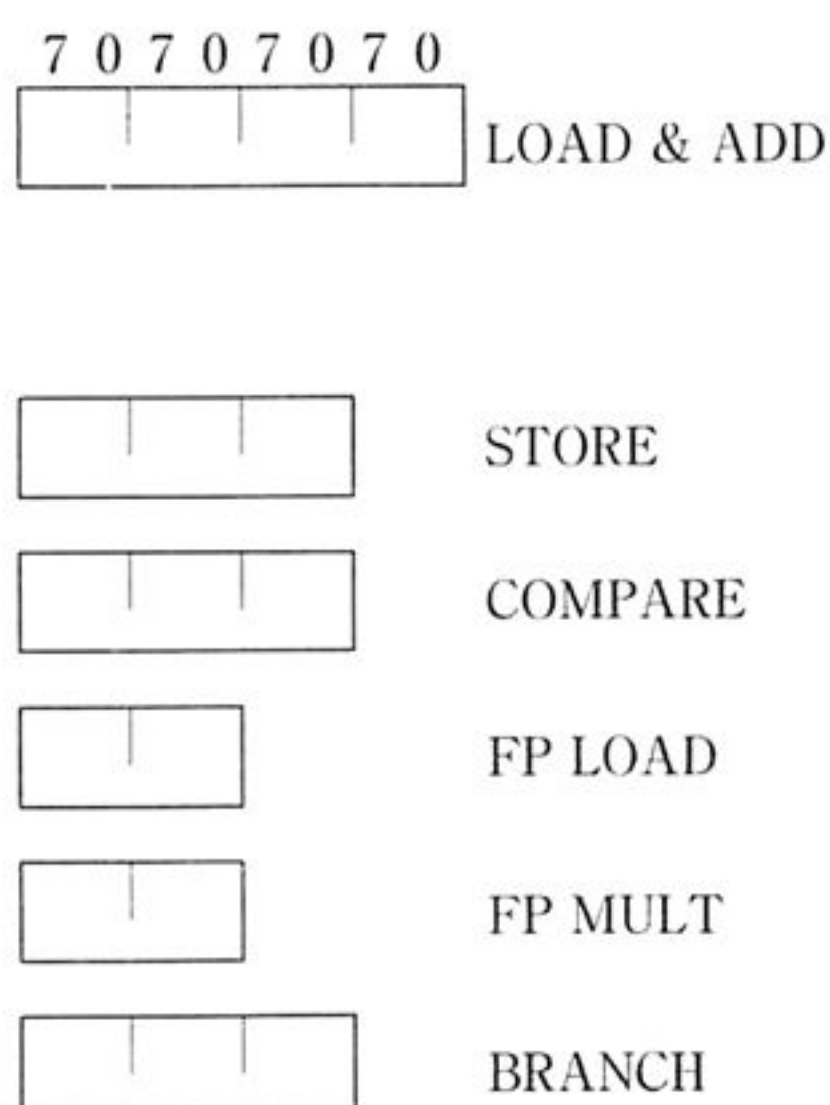
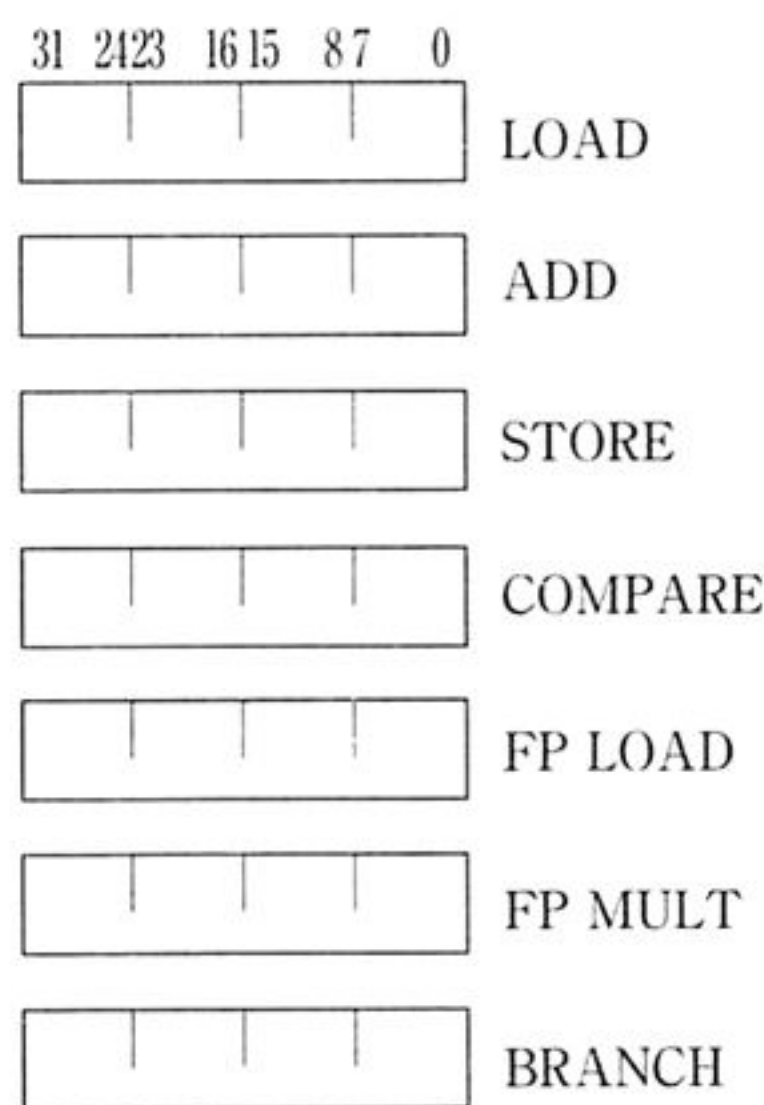
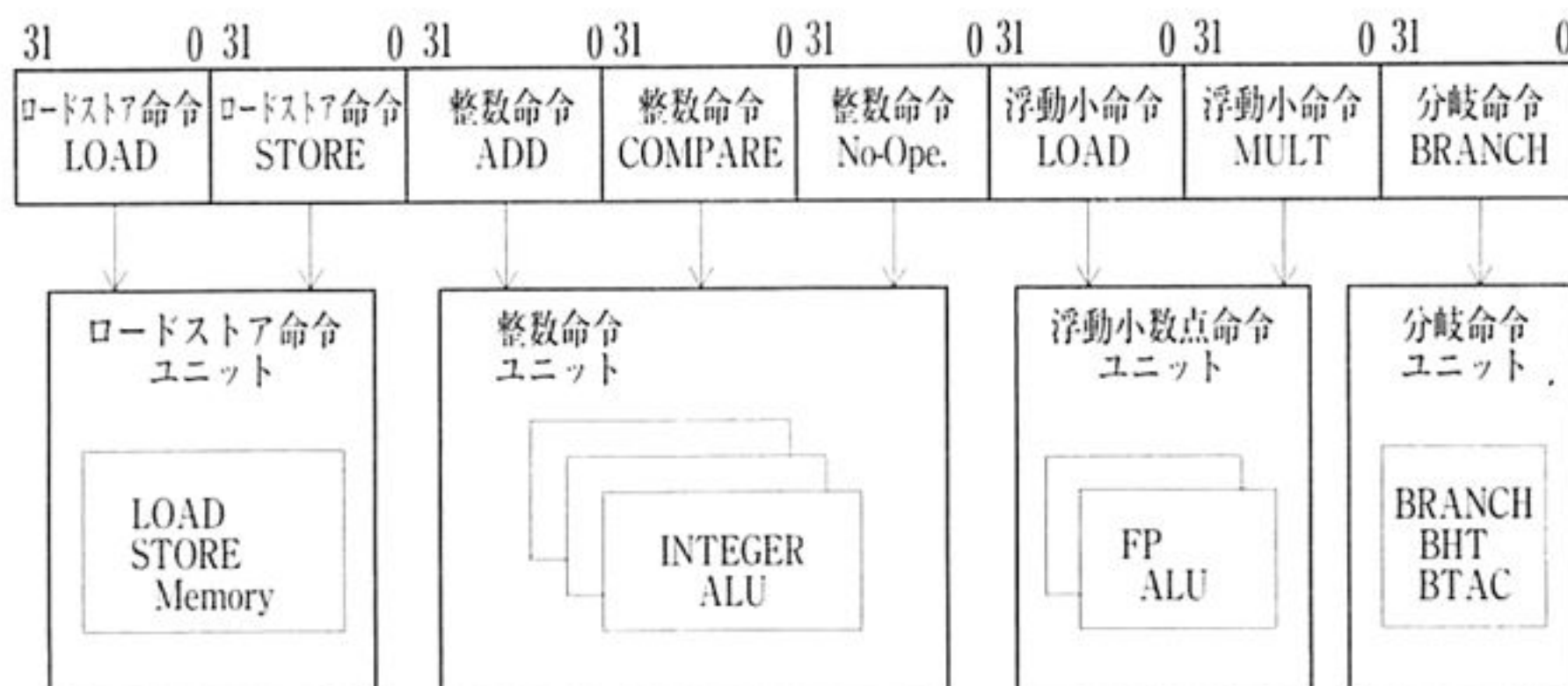



図３－４　CISCとRISCとVLIWの命令形式

E）命令のみ。⑤加算（ＡＤＤ）命令のようなメインメモリ操作以外の操作は全てレジスタに対してのみ適用。レジスタに対する命令には三アドレス方式（例：ａ＋ｂ→ｃ）を採用。⑥全ての命令の長さは三二ビットの一語とする。

ＲＩＳＣプロセッサの萌芽は、一九六四年に開発されたＣＤＣ社のＣＤＣ６６００に見られた。一九七五年に登場したクレイ社のＣＲＡＹ―１ではコンパイラによる最適化は意識していなかったが、既にパイプライン処理を指向していた。一九七五年に開発をスタートしたＩＢＭの三二ビットプロセッサ８０１は本格的なＲＩＳＣプロセッサの第一号だった。

前述したＲＩＳＣプロセッサのアーキテクチャに対する基本的な考え方は、ＩＢＭ８０１の基本仕様に全て盛り込まれていた。さらに、ＲＩＳＣプロセッサの弱点を補うための工夫も採用されていた。それらは、超高速ＥＣＬ（Emitter Coupled Logic）回路を使用した高動作周波数とキャッシュメモリであった。また、それらは現在の最先端技術である並列処理制御であるスーパースカラが使用される以前においては最先端技術であった、遅延ロード、遅延ストアや遅延分岐などの性能向上のための新技術が数多く採用された。

すべてのＲＩＳＣプロセッサはこのＩＢＭ８０１から出発したといっても過言ではない。ただ、ＩＢＭの失敗は自分の成功に価値を見い出せなかったことである。ＩＢＭがＲＩＳＣプロセッサ界に、一九八六年に開発したＲＯＭＰプロセッサを経て、ＰＯＷＥＲアーキテクチャＲ

S／6000で戻ってきたのは十数年後の一九九〇年であった。歴史に「もし」は許されないが、過去二十五年間のマイクロプロセッサの歴史において最大の最も価値ある「もし」である。

パイプラインとスカラ技術について述べる。一般に、命令の制御は、メモリからの命令の読み込み（フェッチ）、命令の解読、レジスタまたはメモリからデータの読み込み、命令の実行、演算結果のレジスタまたはメモリへの書き込み（ライト・バック）の五ステージの機能により構成されている。パイプライン制御技術では、各ステージの処理を独立した別々の機能ユニットが担当している。パイプライン制御とは、一つの命令のある動作が終了すると次のステージの機能ユニットに処理を渡し、空いた機能ユニットで次の命令の処理を行う制御方式である。

例えば、一番目の命令を既に読み込んでいる場合に、一番目の命令を解読をしている時に次の命令の読み込みを行い、一番目の命令のデータを読んでいる時に次の命令の解読を行うと同時に次の次の命令の読み込みを行う。前述の例だと、逐次的に処理すると一つの命令を完了するのに五クロック分の時間が必要であるが、パイプライン制御を用いると命令の実行ユニットで見ていると、各クロック毎に命令が実行されているように見える。命令が読み込まれて結果が得られるまでの一つの命令が完結するまでの実行時間（命令のレイテンシ）は同じだが、単位時間内に実行される命令数（命令のスループット）が増える。スーパーパイプラインとは命令の機能分割を多くし、パイプラインの段数を多くしたものを言う。段数を増やすことにより、

各段の論理は簡単化されより高い動作周波数が可能となる。ただ、あまり多くすると、急にパイプラインの流れを変えるような分岐命令が発生すると、車が高速ではカーブをうまく曲がれないように、マイクロプロセッサはパイプラインに入っている命令が終了するまで待ち状態に入り、性能が低下する。特に、OSの実行中では六命令に一回は分岐命令が発生する。

一方、スカラ技術とは命令の並列実行のことで、命令を実行する機能ユニットが複数本ある。同一クロック内で二つ以上の命令を同時に実行するのをスカラ技術と言い、スーパースカラとはそれ以上の命令の並列実行ができるものをさす。ただ、実際には二つでもスーパースカラと言っている。「スーパー」とは「たくさん」だと思えばよい。したがって、マイクロプロセッサでは、スーパーパイプライン技術を使い超高動作周波数で高性能を達成している会社と、スーパースカラ技術と高動作周波数の組み合わせで高性能を達成している会社がある。前者に力を入れているのがDECとHPとMIPSで、後者にはIBMとサンとインテルがある。

RISCプロセッサの進化

IBM801の登場で刺激されたRISCプロセッサの研究は、カリフォルニア州立大学バークレー校とシリコンバレーにあるスタンフォード大学に引き継がれた。バークレー大学が研究したレジスタバンクがたくさんあるレジスタウィンドウの概念を導入したRISC—I/IIアーキテクチャは後にサンのSPARC(Scalable Processor ARChitecture)アーキテクチャとして実用化された。

一方、スタンフォード大学のパイプライン制御とコンパイラ技術にその特徴を際立たせたMIPS（Microprocessor Interlocked Pipeline Stage）アーキテクチャは、MIPS社のR2000として実用化された。R2000では、まず、複雑な機能をコンパイラに任せることによりハードウェアを簡素化した。次に、より高い性能を実現するために、プロセッサに遅延分岐や遅延ロードのスロットを設け、分岐命令後のスロットに必ず実行する命令を置いたり、ロード命令の後にそのデータを使用する命令を置かない、といった命令のスケジューリングをコンパイラで行わせた。しかし、これらは全てIBM801へのインクリメンタルな改良にすぎなかった。

彼らの最も大きな功績は「昔のコンピュータは悪かった」と言うマーケティング活動であった。RISC型プロセッサはIBMにより研究開発され、バークレー大学とスタンフォード大学でマーケティングされることによって成功したマイクロプロセッサであると言ってよい。

初期の純粋なRISCプロセッサには、CISCプロセッサのアーキテクチャが持つ強力な命令をもっていないという性能面の大きな欠点があった。その欠点を補うために、まず、RISCをワークステーションのマーケットに導入させるために、CISCから浮動小数点命令を借用した。

ところで、メモリとプロセッサ間のデータ転送量はCISCと純粋なRISCとではせいぜ

い同程度でよい。しかし、ＣＩＳＣと同等の仕事を行うには、ＲＩＳＣはより多くの命令を実行する必要がある。その高い命令帯域幅を満たすためには、メモリからプロセッサへの命令群の転送量を多くする必要がある。それらの欠点を補うため、ＲＩＳＣはＣＩＳＣに比べ約二倍の高い動作周波数を使用し、かつ大容量のキャッシュメモリ（一次キャッシュ）が必須となる。

第3節　次世代プロセッサの将来展望

ワークステーションに採用された新技術をパソコンへ移植

ＩＢＭ系パソコンの進化を見ると、ハードウェアはワークステーションの技術から、またオペレーティングシステムはアップル社のマッキントッシュから、それぞれ大きな影響を受けていることが分かる。

ワークステーションは、高性能を第一の目標に掲げているために、より高い性能向上と使いやすさを追求して、次々と新しい技術を導入した。そして、それらの技術は五年位経つとＩＢＭ系パソコンにも取り入れられた。

それらの技術には、一六ビット型プロセッサ、三二ビット型プロセッサ、三二ビット型ＲＩＳＣプロセッサ技術、高解像度グラフィックスディスプレイ、ＧＵＩ（ウィンドウ）、ＬＡＮ、

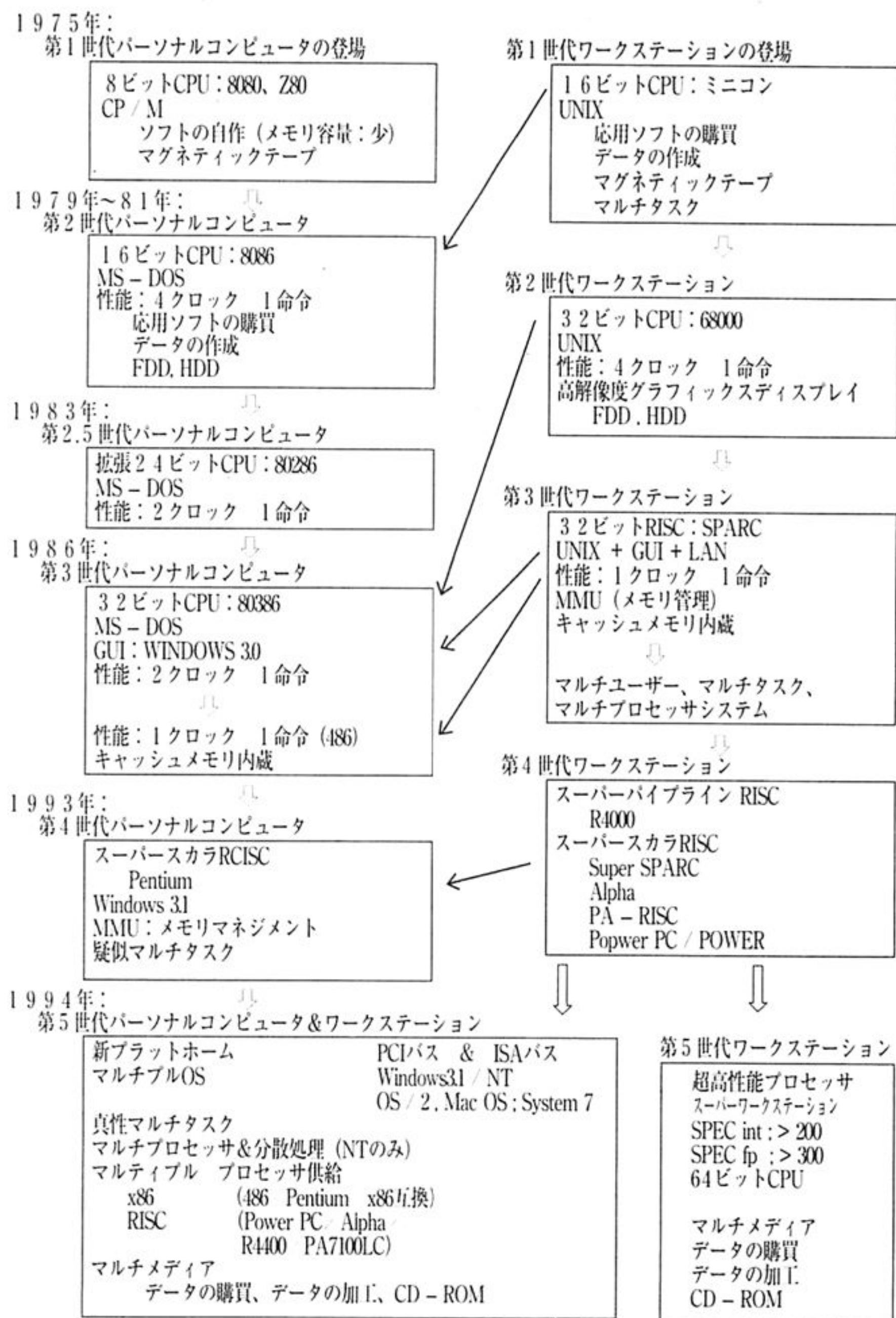



図3－5　X86系のパソコンとワークステーションの発展

高効率コンパイラ、MMU（メモリ管理）、マルチタスク、一次キャッシュメモリ、高性能プロセッサ（一クロック／一命令）、スーパーパイプライン、スーパースカラ、六四ビット・データバス、などがある。

今後、ワークステーションからパソコンに導入される技術には、テレビ会議、マルチメディア用命令、真性マルチタスク、分散処理、マルチプロセッサ、などである。これらの技術は、ウィンドウズ95やウィンドウズNT－CairoのOS登場とともに、二～三年以内にパソコンに導入される。すなわち、ワークステーションに新たな技術が誕生しなければ、量産普及型ワークステーションの大部分のマーケットはパソコンに取って代わられる。

CISCとRISCにおける命令アーキテクチャの競争は終結

CISCプロセッサであるインテルのX86アーキテクチャにおいて、命令がバイト可変長で構成されていることと、三二ビットデータ長に対する命令を実現するための命令コードが十分に予約されていなかったことは、高性能化を実現する時の大きなペナルティーになっていることは自明である。ただし、スーパースカラ技術の導入により、これから三～四年は決して致命傷にはならない。

RISCプロセッサの性能向上のために採用されたパイプライン、スーパースカラ、内蔵一次キャッシュメモリ、分岐予測、コンパイラ技術などは大幅にCISCプロセッサに急速に採用されている。

マイクロプロセッサの性能は、後述する動作周波数当たりの性能を比較すると、スーパースカラ技術の実現方法によって優劣差が決まっている。また、RISCとは縮小命令アーキテクチャだと言うものの、RISC型プロセッサも高性能達成のために、特に超高性能プロセッサにおいては、CISCよりもはるかに複雑な命令を設けている。すなわち、CISCとRISCの違いは「Complexed」か「Reduced」かではなく、レジスターメモリタイプのアーキテクチャなのかロード/ストアタイプのアーキテクチャなのかというメモリアクセスへのアーキテクチャの相違にしかすぎなかったのである。

ところで、典型的なCISCマイクロプロセッサであるペンティアムの性能は、RISCプロセッサを主張したSPARCとMIPSの性能にやっと追いついた。ところが、ペンティアムの追撃を絶とうとして、IBMはPowerPC620を開発し、サンはUltraSPARCを開発中である。したがって、競争はアーキテクチャから、いかに高性能を達成するかの実現方法の競争へと移った。

スペックマーク値による性能競争の激化

マイクロプロセッサ単体としての性能や、システムとしての性能を評価するときの、性能評価プログラム(ベンチマーク)は目的別に数多くある。名前を覚えるだけでも苦痛を伴うし、内容を知ろうとすると難解だし、始末におえないのが性能評価プログラムである。しかし、知っておくとシステムを買う時

に大変役に立つ。

ＲＩＳＣプロセッサを用いたワークステーションが登場すると、実際のアプリケーションプログラムから整数に関して六個と浮動小数点に関して十四個を選び、実際に使われた時間(Elapsed Time)をテストし、結果をＶＡＸ—１１／７８０に対する相対値で表したスペックマーク(SPECmark ; System Performance Evaluation Cooperative)がベンチマークの標準として採用されるようになった。

整数命令の性能評価にはＳＰＥＣｉｎｔ値が、浮動小数点命令の性能評価にはＳＰＥＣｆｐが使われている。整数命令の評価には、論理式生成と最適化、ＬＩＳＰインタープリタ、テキストファイルの圧縮と伸長、表計算、ソフト開発(ファイルコンバージョン)、などが使われている。ＳＰＥＣｉｎｔ値は比較的、ビジネス用アプリケーションに適している。したがって、最近ではＣＩＳＣプロセッサの性能評価にも応用されるようになった。しかし、その評価プログラムの実行に当たってはマイクロプロセッサ内の一次キャッシュのヒット率が非常に高いため一般的な評価にはなりえない。

各社とも新世代のマイクロプロセッサの開発には、スペックマーク値を使って戦略を決定するようになった。また、マイクロプロセッサ単体の性能評価にはミプス(MIPS ; Million Instruction Per Second)値とインテルが提唱しているｉＣＯＭＰ値、パソコンなどのシステ

ムレベルでの性能評価にはドライストーン（Dhrystone）値とシスマーク（SYSmark）値が、ワークステーションでの性能評価にはスペックマーク値が使われている。ただし、iCOMPにはスペックマーク値が含まれているのでビジネスアプリケーションでは注意が必要である。

また、非営利団体であるBAPCo（Business Application Performance Corp.）のシスマークをシステム会社だけでなく、マイクロプロセッサ会社も採用するようになってきた。パソコンシステムとしての性能評価のために、ワープロ、表計算、データベース、グラフィックス、DTP、プレゼンテーション、ソフト開発などが評価の対象になっており、マイクロプロセッサの性能をパソコンユーザーが評価するための最も優れた評価プログラムである。

例えば、二次キャッシュを搭載しなかったり、低速のバスにハードディスクをつないだりしたら、性能の良いマイクロプロセッサを使っても、システムの性能は期待ほどは向上しない。したがって、パソコンユーザーとしては、整数命令の性能値であるスペックマーク値をマイクロプロセッサそのものの性能の目安として、システムマーク値でシステムの性能を判断するのが最も現実的である。

スーパーワークステーションの登場か

今また、新たなマーケットが形成されようとしている。スーパーコンピュータに匹敵するスーパーワークステーションのマーケットである。

DECが外部メモリシステムにあった二次キャッシュメモリを九六K

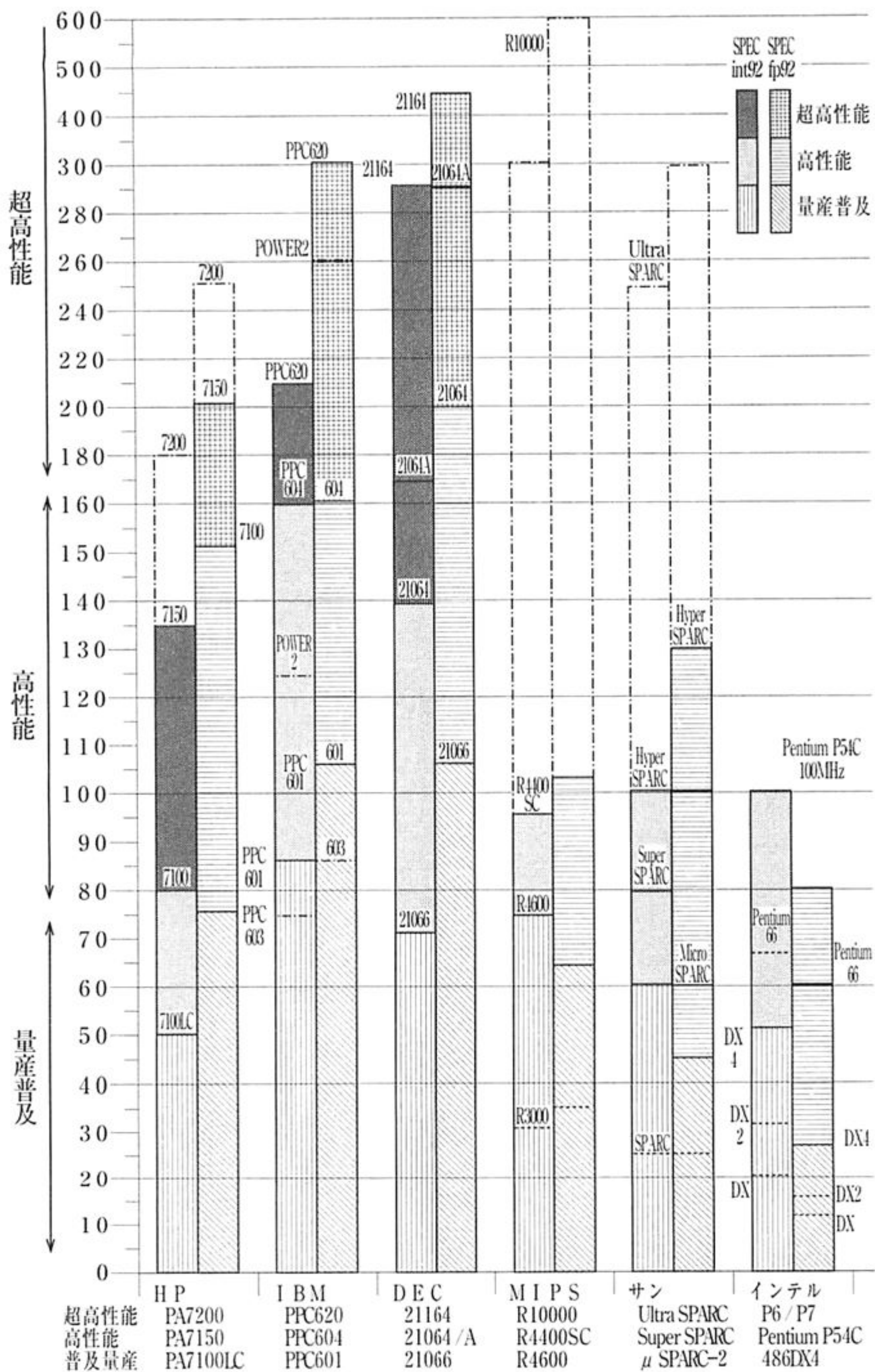



図3－6　次世代マイクロプロセッサの性能比較

バイト内蔵した新型Ａｌｐｈａ２１１６４を発表した。九百三十万個のトランジスタを使用し、動作周波数三〇〇MHzで、三〇〇ＳＰＥＣｉｎｔ、五〇〇ＳＰＥＣｆｐ、最大一・二ＢＩＰＳ（一秒間に命令を一・二億回実行）の性能を予定している。パソコンに広く使われているインテル社の４８６ＤＸ２の十倍の性能である。また一九八一年に開発された初めてのハイパフォーマンス・エンジニアリングワークステーションであるアポロ社のドメインＤＮ－１００の四百倍の性能である。マイクロプロセッサが持つ性能の物凄さが実感される。続いて、サンがＵｌｔｒａＳＰＡＲＣを発表した。四百二十万個のトランジスタを使用し、動作周波数一六七MHzで、二七五ＳＰＥＣｉｎｔ、三〇五ＳＰＥＣｆｐの性能を予定している。

第４節　日米でマイクロプロセッサ開発力になぜ差が出るのか

開拓者魂と起業家精神とアメリカンドリーム

米国がマイクロプロセッサで優位に立てたのは、米国開発技術者が熱望し追い求めている起業家精神とアメリカンドリームのおかげである。新たに会社を起こし、世の中にいまだないものを研究開発し巨万の富を築く。または、創造的で挑戦的なプロジェクトに参加し新規な製品を開発、ストックオプション

を行使することで莫大なお金を得る。ストックオプションとは、入社した時の値段で一年後に株を取得できる従業員へのインセンティブプログラムである。それを駆り立てているものは、国籍に関わらず、米国で働く開発技術者の心の底に流れているアメリカ建国以来の開発者魂である。

私が米国で開発に従事していた一九七〇年代は、開発技術者の半分以上が移民であった。今日でも、東南アジアからの移民（特に中国人）がマイクロプロセッサ開発者に占める割合が非常に高く、挑戦的かつ精力的に仕事をしている。また、マイクロプロセッサの開発が終了すると、その製品を広くユーザーに宣教するためにマーケティング部門へ移ったり、または、そのマイクロプロセッサを使って新たなビジネスを起こそうとして、新会社を設立したりする技術者がかなりいる。会社の命令でマイクロプロセッサを開発するのではなく、あたかも、自分で会社を起こして新製品を開発するように、熱意を持ってプロジェクトに参加している。

また、実力がある開発技術者であれば、会社を変わることにより給料が少なくとも二〇％は上がるので、開発技術者に流動性も生じ、それがまた米国の強さの一つとなっている。あたかも、シリコンバレー株式会社インテル事業部といった感があった。もっとも、プロジェクトの最終結果が出ない前に移籍したりする場合があるので、採用するマネジャーの目が肥えていないと、とんでもない技術者を雇ってしまう。サンやＭＩＰＳのマイクロプロセッサの開発にも、

元インテルの開発技術者がかなりいる。

大きなプロジェクトを統括するゼネラルマネジャーであれば、新規開発技術者の採用、給料、ベネフィット、昇給額を含めた査定などの人事権のほかに、コンピュータなどの機種決定や使用に対しても大きな権限を持っている。インテルで386が開発されたとき、三日間ほど技術関係の全てのコンピュータにアクセスできなかったことがあった。386プロジェクトのマネジャーに電話したら、386が全てのコンピュータを使っていることがわかった。インテルにおける次世代マイクロプロセッサ開発への意気込みとプロジェクト運営方法は、物凄かった。

能力とスピークアウトを重要視

一九七二年に開始した八ビットマイクロプロセッサ8080の開発は、驚きの連続であった。半導体の祖と仰ぐノイス博士が、当時私が勤務していたリコーの取締役に直接電話し、私のインテルへの入社を要請してきた。三回目の渡米ということで、いくらかの余裕があったものの、入社して驚いてしまった。

当時、私は結婚したてで、米国の生活に慣れてから徐々に仕事を始めようと思っていた。ところが、インテルはアパート、家具、寝具、食器、当座の食料とお金、車のローンを用意していただけでなく、永住権（グリーンカード）を取るためにサンフランシスコで一番といわれた弁護士も雇って待っていた。世界初のマイクロプロセッサ4004を開発した実績はあったが、それほどまでノイス博士が開発者の能力を評価したことに感激した。また、ノイス博士は

創造的開発にとって最も必要な「全面的な支持者」として常に助けてくれた恩師でもあった。
仕事を始めると、三カ月ごとに給料が上がっていったのにも驚かされた。いわゆる優秀といった程度では最先端のマイクロプロセッサの開発は難しいので、能力のある技術者は特に会社設立に当たっては重要視されている。したがって、プロジェクトマネジャーは料理屋の主人と同じで、メインのコックが辞めたら、次のコックを翌日には連れてこれるようでないと務まらない。そのため、技術者間の情報交換はかなり頻繁に行われている。
渡米して一週間が経ってから、８０８０はどうあるべきか、その仕様の検討会が始まった。４００４や８００８を一緒に開発した仲間だから、第一世代のマイクロプロセッサに抱いていた不満が一気に爆発するように、活発に自由な討論ができた。自由な討論というと聞こえが良いが、これが物凄い会議のやり方だった。事前に資料は配られない。会議中に考え、相手の考え方を評価し、自分の意見を述べなければならない。頭の良さと回転の速さと強さを兼ね備えない限り、とても会議では勝てない。
自分の意見を述べるというスピークアウトの教育を、幼稚園時代から徹底して教えられている米国人にはできるが、「沈黙は金である」を尊重する日本人にはとてもできない。会議で黙っていれば、発言しない者は出ていけと言われ、会議で最後まで残った意見が絶対であるので、命令に従わざるを得ない。自由と権利は勝ち取らないかぎり得られないと初めて実感した。

よかれあしかれ、日本には、日本特有な和の精神があるので、他人の間違いや欠点を指摘することは難しい。しかし、真のチームプレイのためには、開発には他人の仕事を正確に批評する必要がある。それは、後述するデザインレビュー（設計評価）やデバッグ（欠陥除き）時には必須な作業である。

マイクロプロセッサ開発手法の確立

マイクロプロセッサの開発手法は、米国では十五年以上前に確立した。8080の仕様が決定した一九七二年十二月に、論理や回路設計の次の設計段階であるパターン設計を翌年の一月二日に始めることが決定された。そこで、いかに効率よく正確に各種の設計を行うかが問題となった。特に、設計時間が長くかかるパターン設計において、アイドル時間を減らすために、各設計段階で設計プランとそのストックを確保することが鍵となった。ストック量は約一カ月分は最低必要であった。その後、設計プランは製品設計計画書（プロダクト・インプリメンテーション・プラン）、設計ガイドブック、設計報告書（デザインリポート）などに進展していった。

さらに、マイクロプロセッサが複雑になってくると、経験と能力と人種が異なる多くの開発技術者を使うために、統一した設計思想や設計手法や設計手段を導入する必要があった。ガイドブックは、開発の途中では決して破ってはいけない。バイブルへと名前を改め、論理用、回路用、パターン用、テスト用バイブルへと発展した。さらに、設計の進捗状況を把握し、適切

な措置をするために、また若い技術者を指導したり、仕事の仕方の間違いを早めに見つけるためにも、設計プランとスケジュールに関して、報告（ステータス）と目標（オブジェクティブ）と実施案（アクション・リクアイアメント）などを討論する会議が月単位と週単位で行われるようになった。

一六ビットマイクロプロセッサの開発の時代に入ると、製品設計計画書、設計バイブル、設計報告書のほかに、論理シミュレーション、人員、CAD導入、試作、生産、投資に対する利益などのバイブルや計画書を新たに追加した製品計画書や開発方法論が導入され、巨大プロジェクトの立案、計画、運営などのノウハウを確立していった。

一九七〇年代の後半に入ると、開発作業が細分化され設計そのものも難しくなり、チップ全体や各モジュールでのデザインレビューが必須となった。なんとなく、誰にでもできそうな感じがするが、創造的な開発、スピークアウトに基づいた真の討論、ドキュメンテーション、批評（クリティサイズ）などの経験がなく、プレゼンが下手な日本人にはかなり難しい。

また、開発では二つの人格が要求される。開発の前半では、特にアーキテクチャ設計においては、技術者の良いところだけをとるために、性善説で仕事を進める。一方、開発の最後のステップでは、全てをまとめ決断したり、試作した製品をデバッグするから、全体の一〇％の肉体的な仕事に九〇％の頭脳の集中力が必要となり、決断力のあるプロジェクトマネジャーを使

って、性悪説で仕事を進める必要がある。

スケジュールを逆算してたてる米国技術者

米国人の気質は、マイクロプロセッサの開発に関しては、日本人より適している。米国人にも仕事に夢中になるワーカホリック（仕事中毒者）がいて、朝の八時から夜の七時まで仕事をみっちりやる。必要であれば、七時に会議を招集しても文句を言わない。今の日本人よりも高度成長時代の日本人に似ている。昼の一時間の休みを除いて、十時間ぐらい集中力を保ちつつ働くことができる。長時間の発想と評価、批評と発言と討論が必須の会議や、長期間にわたる集中力が必要とされる論理や回路設計などで必要な柔軟で強く回転の速い頭脳、それと仕事への体力は日本人より米国人のほうがはるかに優れている。

日本人を連れていって一時間の会議を連続して六回続けただけでギブアップしてしまった。米国の開発技術者と比較して、あまりに弱くてがっかりしたことが多い。日本人も国際的になるには、頭脳と肉体的な体力が欠かせない時代になった。午前中から頭脳が高回転かつ高出力を発揮できないようでは、とても米国には太刀打ちできない。

また、米国人は、働くときは働くが、休むときには徹底的に休むために、スケジュールを逆算してたてることが非常にうまい。したがって、日本人に特有な個々の過程を積み重ねて計画を立てがちな方式と比較して、ボトルネックがどこに生じそうかも事前にわかり、スケジュー

ルの調整もあらかじめでき、仕事が日本と比べてはるかにやりやすく効率的だ。
仕事の速度も速い。どちらかと言うと、日本人は一つのことをじっくりやりたがる傾向があるのだが、マイクロプロセッサの開発では、アーキテクチャ、論理、回路、パターン、テストなどの異なる設計があり、一つの段階の仕事をするためには両脇の仕事を把握しないとなかなかうまく行かない。一つの仕事をじっくりやるよりも、いろいろの仕事を素早く、少なくとも三回はやった方がはるかに良い仕事ができる。そういうスピード感のある仕事のやり方というのは、若い時に習得しないと一生身につかない。開発製品には競争相手がおり、新製品は生ものと同じである。時間が経つと活きが悪くなるし、陳腐化したら誰も買わない。
何事もそうかもしれないが、マイクロプロセッサの開発でも、一回目は習うことで精一杯だし、二回目では覚えたことがやっと使えるようになり、三回目で余裕が出て自分なりの発想に基づいた開発ができるものである。また、米国人は自分のキャリアパスを計画するので、脚光を得られる仕事だけを欲せず、将来に必要な技術を貪欲に吸収しようとし、嫌な仕事でも百点を取ろうとして一生懸命やり、教え甲斐がある。スピード感ある仕事のやり方を習得すると同時に、開発に関する全ての仕事を三十歳になるまでに一通り習得しないと、ただの技術者で終わってしまう。
ところで、米国の大学生は勉強をよくやり、学生時代に将来に役に立つ専門分野のアルバイ

トをするので、仕事をすることとは何か、を教える必要がない。大学卒業者を採用しても、日本の修士卒業者より優れていることが多い。また、米国の大学教育は優れていて、入社した直後に基礎的な専門教育を短期間で終了させることができる。日本だと、電子工学を専攻していても、基礎的なことを知らないので、原理から教えないといけない。

新規性のあるものを生む開発者とは

創造的開発とは芸術であり宗教であり、アイデアとは個性のほとばしりである。八ビットマイクロプロセッサ8080を開発する頃までは、開発者の発想を尊び、チップに開発者のサインを記すことが許された。私もサインの代わりに自分の家紋を入れた。インテルでは、8080の次のプロジェクト8085の時は、チームプレイということでサインが許されなかった。

ところが、素人を使ったために改善はなされたが、傑作機は誕生しなかった。この失敗で、マイクロプロセッサの開発には絶対的に優れた能力者が必要だとわかり、優秀な人材を集めるようになった。創造的開発とは、市場に未だ無い製品を研究しつつ開発するので、成功という希望と、失敗という不安を抱き合わせて、人跡未踏の原野を羅針盤も持たずに進むようなものである。すなわち、創造的開発は、インクリメンタルな改良や改善ではなく、ベターではなくベストな製品を生み出すのだから、過去と現在を分析・解析し、昇華し、捨てなければ容易にはできない。

過去と現在を捨て去ることは、特に論理や回路設計などは、非常に難しい。日本人はとりわけ結婚すると保守的になり、守りの体制に入ってしまう傾向が強く、技術を積み重ねて自分の財産にすることに執着する日本人に「過去を捨てなさい」ということは非常に大変な作業である。開発こそ我が道であると心底思う人でなければ、マイクロプロセッサの開発には適さない。新規概念は、最初に理解者はほとんどいないし、無視されたり、低い評価しか得られない。もっとも、開発コンセプトである新規概念を生むためには、人が歩んだ道を行ってはいけない。新規概念は、何カ月もかかって考えたことを会議にかけ、即座に大半の賛成が得られたら、それは新規概念でもなんでもない。

また、せっかく良い考えが浮かんでも、いわゆる優秀な人ほど、自分の発案したことはもう他の人も考えているのではないかと思う傾向があるが、世の中では同じときに同じことを発案するのは三人しかいないものである。発案したとしても、全員がそれを実現化するとは限らない。何か新規なものが開発されると、私も考えたことがある、ということを耳にするが、考えることと実現することとは全く違うことである。

開発者の頭の中は誰も知らないから、まず自分の世界を創り、新規概念をいかにうまく理解させるかのストーリー作りが必要となる。自分が考えたものがベストと信じつつ、不退転の意志で会議に望まないといけない。

新世代の高性能なマイクロプロセッサの開発においては、高性能が実現できる新世代の半導体プロセスが必須であった。したがって、新しい半導体プロセスの詳細な仕様が決まると、細心の注意を払って、半導体プロセスの各種のパラメータが正しいかどうかを確認し、回路シミュレータに使用している各種の式の確認を行い、パラメータを回路設計に必要な回路シミュレータに入力する。この作業に失敗すると、でき上がったマイクロプロセッサの性能が期待通りには実現されない。

一九七〇年代は、半導体プロセスの変遷の激動期であった。半導体プロセスは、電荷の移動を使ったＰＭＯＳから、より高速性が期待できる電子の移動を使ったＤＲＡＭメモリ用高電圧ＮＭＯＳ、ＳＲＡＭメモリ用低電圧ＮＭＯＳ、イオン注入技術を使ったＮＭＯＳ、そしてショートチャネル版ＨＭＯＳへと、わずか八年の間に五回も変わった。

したがって、実用化試験が終了していない半導体プロセスを使ったり、半導体プロセスの進化が非常に大きく安定しない時代であった。また、外部の商用の回路シミュレータを利用すると、使われている式に間違いがあったりしたこともある。半導体プロセスの技術者が経験不足で、ケアレス・ミステークがあったりして間違ったパラメータを提出してくることもあった。経験があまり役に立たない時代でもあった。

そこで、半導体プロセスの性質や性能や実装密度などを調べるためのテスト回路を常に用意

しておき、同時に、大学で電子工学を、そして修士コースで半導体を主とした物性を専攻した技術者を使い、提出されたパラメータや式を論理的に検証させつつ、テスト回路を使って回路シミュレータ自身の検証も行った。工学系出身者であったので、与えられたパラメータと各種の式を自由に操って検証作業はできたが、プロセスの変遷があまりに大きかったこともあり、与えられたパラメータが正しいかどうかの判断はあまり上手ではなかった。使う技術は大学で習得したが、本当かな、何故かなと、疑ったりする技術は習得していなかった。

一般的に、特に日本の若い技術者では、技術を習得したい気持ちが強すぎて、自分で考えることよりも、他人から教えてもらう方を選んでしまう傾向がある。インテルで四KビットのDRAMが開発されたときのエピソードだが、最初に開発したグループの仕事がなかなか収れんしなくてプロジェクトが失敗し、二番目の開発グループに仕事が引き継がれた。ところが、そのグループは前者が残した資料を全部捨ててしまったのである。資料を捨てるのはもったいないな、と言ったら、自分たちは開発のために雇われたから、自分達のアイデアで成功させてはじめて自分達の価値を認めさせることができるのだ、と言われた。実際は資料を見てはいると思うが、米国での開発とは物凄いものだと感心した。

もっとも、私も8080を開発したときは前世代の8008の資料は一切参考にはしなかった。開発とは、前者の後追いをしてもインクリメンタルな程度しか改良されないから、無から

出発するのが正解である。

マイクロプロセッサ開発力の日米の差

マイクロプロセッサの開発力は、マイクロプロセッサを作るに当たって重要な要因の一つとなるが、決定的な要因ではない。最も重要なことは、いかに作るかではなく、どんな仕様のどんな性能のマイクロプロセッサを開発するかである。日米のマイクロプロセッサ開発力の差は、開発する製品そのものの違いにより生じている。

インテルに経営的な安定をもたらしたのは、386マイクロプロセッサ開発の成功であった。それまでは、いわゆる五年に一回襲ってくるシリコンサイクルという半導体業界不況の波を避けられなかった。最先端のマイクロプロセッサの開発には莫大な資金がいる。マイクロプロセッサ本体の開発ばかりでなく、ユーザーがシステムを開発していく段階で必要とするデバッグ用の開発支援機器とアセンブラや高級言語コンパイラなどの言語の開発も必要である。さらに、そのマイクロプロセッサを世の中に広く浸透させるためのマーケティング活動が必須となる。このマーケティング活動に膨大な経費がかかる。

一九七〇年代の日本では、あまり大きな資金が必要でない、制御用高集積化マイクロプロセッサであるワンチップマイコンの開発に力を注いでいた。それらは、古い世代のマイクロプロセッサの改善版であるので、マイクロプロセッサとしての開発技術の蓄積にはならなかった。

また、正式にライセンスを習得して製造していた会社もあったが、チップのパターンに対しての著作権が成立していなかったので、米国で開発されたマイクロプロセッサを、写真を撮ったり、顕微鏡などで細部の解析をしたりして、コピーして無許可で製造していた。いわゆるリバースエンジニアリングであり、最も恥ずべき行為であった。無から有を誕生させる新規マイクロプロセッサの開発と、現実に動作しているものをコピーする設計とでは、技術の種類も程度も全く違う。リバースエンジニアリングでは、コピーしたパターンから回路図を作成し、回路図を論理図に変更し、論理シミュレーションを実行して、コピーしたパターンに間違いがないかを確認する作業を行う。新規製品の開発とは全く異なる技術である。

一九八〇年代後半から高性能マイクロプロセッサの開発競争が始まった。インテルは一命令／一クロックの性能を持つ486プロセッサを開発し、ワークステーションの会社はより高い性能が期待できるRISCプロセッサで二倍以上の性能を提供して、インテルに対抗しようとした。また、性能の鍵の一つとなるC言語用コンパイラの開発にも力を注いだ。

続いて、一九九〇年代に入ると、スーパースカラ技術やスーパーパイプライン技術や超高動作周波数を使って性能の競争が激しさを急激に増した。マイクロプロセッサにコンピュータ以上の性能が期待できるような時代に入ったのである。高性能コンピュータに採用された超近代的なハードウェアアーキテクチャを導入し、より高い性能を達成するために、非常に多くのコ

ンピュータサイエンス技術者が採用された。さらに、命令セットの効率度や動作周波数当たりの性能度の計測、解析、評価、改良などを担当する性能評価グループを新たに編成した。

コンピュータの会社では、試作機が完成すると、性能評価グループにより試作機が評価され、命令セットを改良しアプリケーションプログラムのサイズを縮小させたり、実行時間を短縮させ性能向上を図っている。ＩＢＭは、コンピュータ会社の持つ性能評価技術を使っただけで、386を改良して486と同等の性能を引き出すことに成功した。今や、超高性能マイクロプロセッサの開発は、半導体開発技術とコンパイラを含めたコンピュータ開発技術を融合しなければ成功できなくなった。

一九八〇年代、日本では、日本から初めて発信したＯＳであるトロンＯＳ用に各種のマイクロプロセッサが開発された。ところが、趣旨は素晴らしかったが、マイクロプロセッサの命令アーキテクチャに問題があった。高性能なマイクロプロセッサを実現するために、米国ではＲＩＳＣプロセッサであるロード／ストアアーキテクチャが採用された。一方、トロン用マイクロプロセッサは、一九七〇年代に一世を風靡したミニコンと一六ビットマイクロプロセッサを合体させたような命令アーキテクチャで、究極のＣＩＳＣプロセッサとも呼ばれる。

ＲＩＳＣプロセッサ時代の到来を読み切れなく、時代に逆行するような、ボタンを掛け違えてしまったような印象を受けた。トロン用マイクロプロセッサの性能は決して悪くはなかった。

しかし、トロンが完成した時に、世の中はＲＩＳＣプロセッサの時代になってしまったので、誰も正当に評価しなかった。現在、トロンは中性能以下の制御向けマイクロプロセッサとしての道しか残されていない。高性能用制御向けマイクロプロセッサとしては、インテルとＡＭＤの超・高性能ＲＩＳＣコントローラという強敵がいるので、苦戦を強いられる。

日本では、一九九〇年代前半のいま、ＲＩＳＣコントローラの開発に力を注いでいるが、ワンチップマイコンの一九九〇年代版といった感がある。

ＲＩＳＣプロセッサによる性能向上も限界に近づきつつある。西暦二〇〇〇年は、後述するＶＬＩＷアーキテクチャの時代となる。ＶＬＩＷアーキテクチャをいかに開発製品に使うかが、今後の日本のマイクロプロセッサの将来を決める。千万個以上のトランジスタを使う巨大プロジェクトであるので、一社ではとても資金的にも人員的にも負担できない規模となる。国家的プロジェクトとして臨まないと、高性能マイクロプロセッサは今後とも永遠に米国からの輸入に頼らざるをえなくなる。

コンピュータ支援設計ツールであるＣＡＤ技術では、もっと大きな差がついてしまっている。特に新世代のマイクロプロセッサ開発に必須な先進のＣＡＤ技術に関しては、完全に米国に頼っている。日本にも独自に開発したＣＡＤ技術があるが、その機能は新たに開発された米国のＣＡＤ機能をいち早く模倣したものであって、貿易摩擦を起こしかねない危険性を含んでいる。

第4章

マイクロプロセッサとコンピュータ業界

第1節

インテル系×86プロセッサの現在と将来

インテル系×86の強みはウィンドウズ互換

一九九一年に、パソコンの総生産台数は約二千五百万台、一九九一年までに出荷されたウィンドウズ3・0の累計本数は五百万本だった。パソコンの市場規模は一九九四年に年間で約四千六百万台に成長した。そのうちIBM互換パソコンは八五%以上の市場占有率を誇り、大半はウィンドウズ3・1を搭載している。ウィンドウズ3・1を動かすためには少なくとも三三MHz版486SXの性能が必要である。

インテルのパソコンに対する市場占有率は金額で約七五%、台数で約七〇%だから、途方もなく大きなビジネスである。また、パソコン上で使用できる個人向けCADであるAutoCADの市場では、豊富な容量の一次キャッシュを積んでかつ高性能な486DX4やペンティアムが最適なマイクロプロセッサである。これらは全てインテルのX86シリーズがウィンドウズと互換性があるからである。

また、高性能が要求されるサーバーでもウィンドウズ互換である方が操作も管理も容易である。マイクロプロセッサが使われているシステムでは「初めにOSありき」と言われるくらい、

OSがシステムビジネスの勝敗を握っている。

X86互換MPUの登場と互換性の定義の変化

パソコンビジネスが台頭した時、OSも重要であったが、マイクロプロセッサはもっと重要であった。最初のX86マイクロプロセッサである8088がパソコンに採用されて以来、長い間インテルがマイクロプロセッサを独占していた。その頃はパッケージの端子の配置ばかりでなく、テスト装置での互換性もないと使ってもらうことは非常に難しかった。マイクロプロセッサがパソコンなどのシステムビジネスの死活を握っていたといっても過言ではない。

一九八〇年代初め、半導体製品が品薄状態になり、利益率の低くなった8085の生産を極端に縮小したときがある。8085の入荷が突然なくなり、生産を停止せざるをえなくなったプリンタ工場が続出した。工場を訪ねると、8085だけが搭載されていないプリンタが何千台と生産ライン上に止まっていた。大量生産の恐ろしさを目の当たりに見て言葉が出なかった。

しかし、この数年で、AMD(アドバンスト・マイクロ・デバイセス)、サイリックス、ネクスジェン、TI(テキサス・インスツルメンツ)がX86互換製品を開発した。いったん、互換製品が豊富に市場に出回ると、互換性の問題はピン互換からウィンドウズ互換へと変わった。

AMDは、ピン(端子)互換を保ってはいるが、宣伝の仕方を486互換チップからウィン

ドウズ互換チップへと変更した。サイリックスやＩＢＭの４８６互換チップはピン互換を保った版でも、内部の論理回路の相違により、命令の実行クロック数がインテルの４８６と違っている。さらに、ネクスジェンのペンティアム互換であるＮｘ５８６はピンも内部タイミングもペンティアムとは全く違っている。

現在は、互換性に関してはパソコンの主基板であるマザーボード互換の時代に入った。すなわち、ウィンドウズと命令セットでの互換性が保て、パソコンに組み込みが可能であれば、マイクロプロセッサは何でも構わない、極端に言えばＸ８６と互換でなくても構わない時代に入った。

８０２８６はウィンドウズには不向きだった

８０２８６は合計四千万個ほど売れた素晴らしいマイクロプロセッサであったが、ウィンドウズ用のマイクロプロセッサとしては成功しなかった。８０２８６への進化の最も重要な点はプロテクト（保護）モード機能とメモリ管理機能の追加であった。

８０８６モードのことをリアルモードという。プロテクトモード下では、ウィンドウズには欠かせない機能である、メモリ管理、保護機能、マルチタスクなどの機能が使える。メモリ管理機能とは、最大三〇ビットの論理アドレス（仮想アドレス）で表現される複数タスクを、どのように、二四ビットの実アドレスでアクセス可能なメモリに割り当てるかを管理する機能で

ある。保護機能には二つあり、一つは論理アドレスを実アドレスに変換するときの保護機能であり、もう一つは四レベルある特権順位の保護である。８０２８６の保護機能は、あるタスクが勝手に他のメモリへアクセスするのを防いだり、アプリケーションプログラムがオペレーティングシステムを破壊することからシステムを保護する。

パソコンでは四レベルある特権の内、最も高い順位をOSが使い、最も低い順位をアプリケーションプログラムが使っている。マルチタスクを効率よく動作させるために、各タスクが占めるメモリ空間であるローカル空間と、複数タスクの共通の部分が占めるメモリ空間であるグローバル空間をサポートする機能がある。８０２８６がウィンドウズ用のマイクロプロセッサとして成功しなかったのは、速度という性能が悪かったことと、８０３８６がウィンドウズ出現の前に登場してしまったことである。

４８６とペンティアムは単なる高速版８０３８６だった

一九八五年に開発された三二ビットマイクロプロセッサ３８６は、高性能DOS用マイクロプロセッサとして、一九九〇年までに累計八百万台のパソコンに使われた。三二ビット用OSも言語もアプリケーションソフトウェアもなかった時代に、一六MHz動作周波数による高性能で高機能な三二ビットパソコン、という夢のある名だけが販売促進のキャッチフレーズだった。と言うのは、インテルが一六MHzの８０２８６を製造しなかったからである。これが、今日、X８６互換マイクロプロセ

ッサがエンドユーザーに本当に必要な理由である。

386は、まず、80286の持つ全機能に加えて、内部レジスタを全て三二ビットにし、二本のセグメントレジスタを新設し、強力で豊富な三二ビットデータ長用の命令とビット操作命令を追加した。論理（仮想）アドレスは、セレクタの二ビットを特権順位に使っているので、一四ビットのセレクタと最大三二ビットのオフセットにより、四六ビットとなった。

四六ビットの論理（仮想）アドレスとは五一二Mバイトのハードディスクの十二万倍以上の大きさの仮想メモリである。また、四Gバイトと言う大きな実メモリが実装できるように実アドレスも三二ビットに増加させた。

セレクタで選択するセグメントユニット内の先頭番地とプログラムで指定するオフセットを三二ビットにし、ページングによるメモリへのマッピングができるセグメント／ページング併用方式を採用し、仮想メモリ機能を強化し、大きな論理的なメモリ空間を必要とする新世代のウィンドウズに対処した。

セグメント方式だけだとセグメントの長さが一定でないため物理アドレスでアクセスする実メモリの制御が難しい。そこで、命令とデータで共用しているが三十二本のTLBというページ・テーブル・エントリを保持するキャッシュであるアドレス変換用テーブルを用意し、生成された実アドレスを二つのアドレス変換テーブルを持ったページング機能（二レベルページン

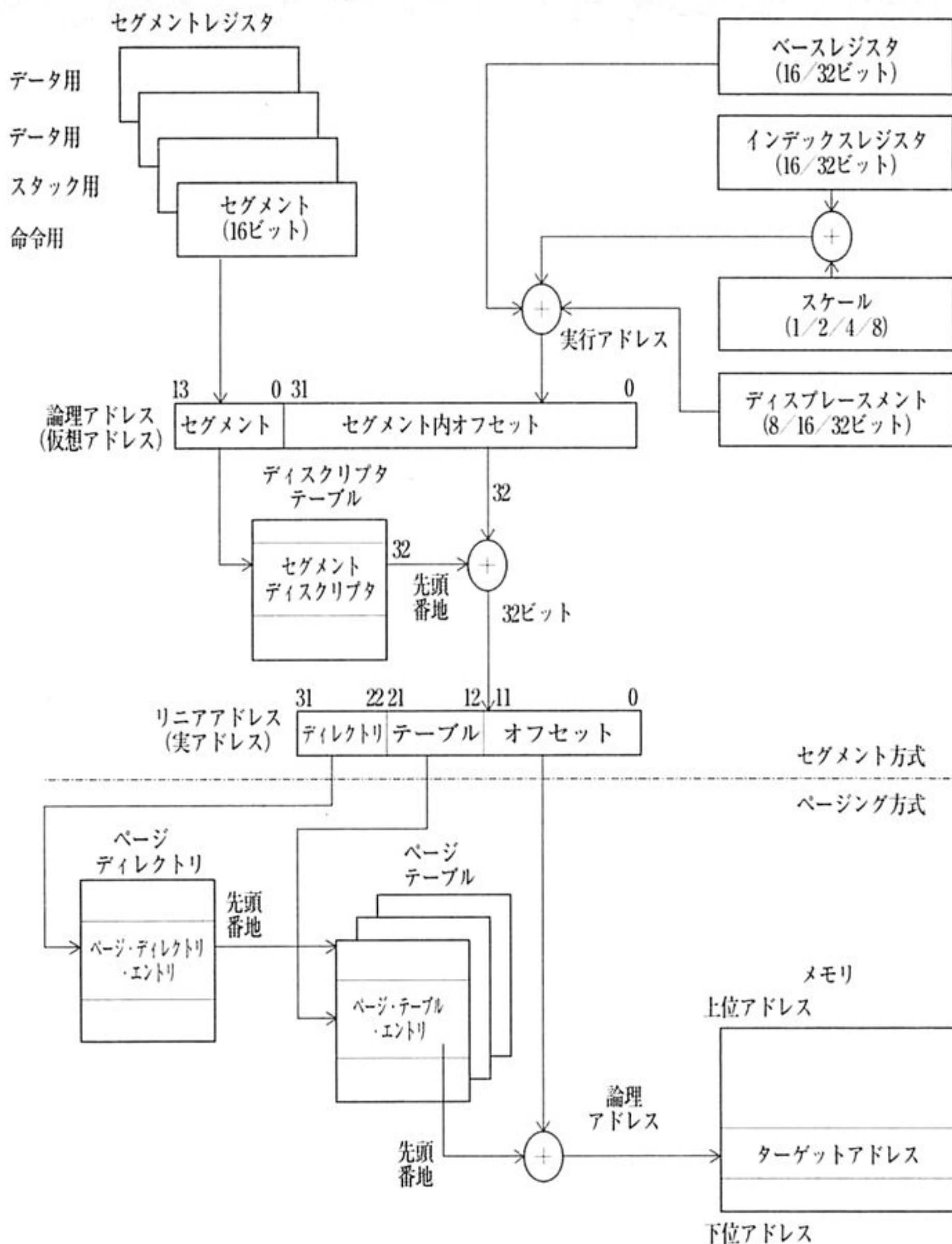



図4－1　386のセグメント／ページング併用方式のアドレス計算

モトローラのMC68000に採用されたリニア・アドレス方式では、セグメントレジスタがない。
相対アドレス方式では、ベースレジスタとしてプログラムカウンタが選択され、ディスプレースメント値は符号付となる。

グ）を介して、長さが一様（386では4Kバイト）であるページに分割して、実アドレスを物理アドレスに変換する工夫がなされた。三二ビット版ウィンドウズ95ではセグメントユニット内の先頭番地を常に「〇」にして三二ビットのリニアアドレスを利用しているが、ウィンドウズ3・1ではまだ一六ビットのセグメント方式とページング方式を併用している。

OSは搭載した物理メモリの大きさを見て、物理的に十分な空きがなければ、物理メモリとハードディスク間のスワッピングにより不必要なページを入れ換える。ところで、セグメント／ページング併用方式はPowerPCにも使われているが、他のRISCプロセッサはページング方式のみを採用している。

386命令の唯一の弱点はいかにして三二ビット・データ長用の命令コードを見つけるかであった。そこで、データとアドレスにそれぞれ一つずつプリフィックス命令を用意し、プリフィックス命令が付いた命令では一六ビット長データまたはアドレスを三二ビットと再定義したり、特別なフラグをセットしておけば、普段は一六ビットの代わりに三二ビットが選択され、プリフィックス命令が付けば一六ビットと再定義する工夫をした。ただし、これらの命令解読そのものがX86の性能向上へのボトルネックの一つとなっている。メモリバスには二クロック／一メモリサイクル方式を採用し、最も速い命令を二クロックで実行した。

一九八九年に486が開発された。浮動小数点演算ユニットを内蔵化し、命令とデータで共

用する八Kバイトの一次キャッシュメモリを新設し、最も速い命令を一クロックで実行、命令の平均実行クロック数は386の約半分になった。システムバスに、命令やデータの読み込み時に一六バイトを五クロックで転送できるバースト転送モード方式を採用し、一次キャッシュへの高速データ／命令転送を実現した。また、486では、二次キャッシュをフラッシュ（クリア）する命令を設けたが、386との互換性保持のためにパソコンメーカーもソフトウェア会社も486特有な命令は使わずに、単純に高速版386として使っている。

一九九三年にはペンティアムが開発された。まず、内蔵の一次キャッシュを一六Kバイトに増大させた。命令とデータを一つのキャッシュで共用すると、命令へのアクセス時にデータ転送を行うと衝突が起き性能が低下するので、これを防ぐためにハーバード方式という命令用とデータ用のキャッシュを物理的に分ける方式を導入した。

さらに性能向上のために、マイクロプロセッサからメモリへのデータ転送時に、遅い外部メモリへのデータ転送を禁止し、データを一次キャッシュに書き込むだけで完了させるライトバック方式を採用した。また、制限はあるが二つの命令を同時に実行できるスーパースカラ方式を採用、さらにワークステーションには必須の浮動小数点の性能を大幅に向上させ、マルチプロセッサを実現させる機能も追加した。

ところが、命令アーキテクチャそのものは386を継続させたに止まった。したがって、ペ

ンティアムも486と同様、命令アーキテクチャに手を加えず、高性能を達成するためにハードウェアを改善したのみの、386の超高速版だと言える。

ペンティアムでは、ワークステーション市場に入るべく浮動小数点命令の高性能化に力を入れ過ぎたのが裏目に出た。一九九四年暮れに浮動小数点除算命令にバグが見つかり、米国のインターネットでその情報が流れた。九十億回に一回しか起きないエラーだとか、一般的なユーザーは浮動小数点命令を使っていないから実害がない、ということだが、結果が誤っても誰もわからないし、将来的に使う場合もあるし、ユーザーは信用と将来性にも高いお金を払っている。車と同様に欠陥品はリコールするのが会社の義務である。

互換マイクロプロセッサの台頭と知的財産権と特許

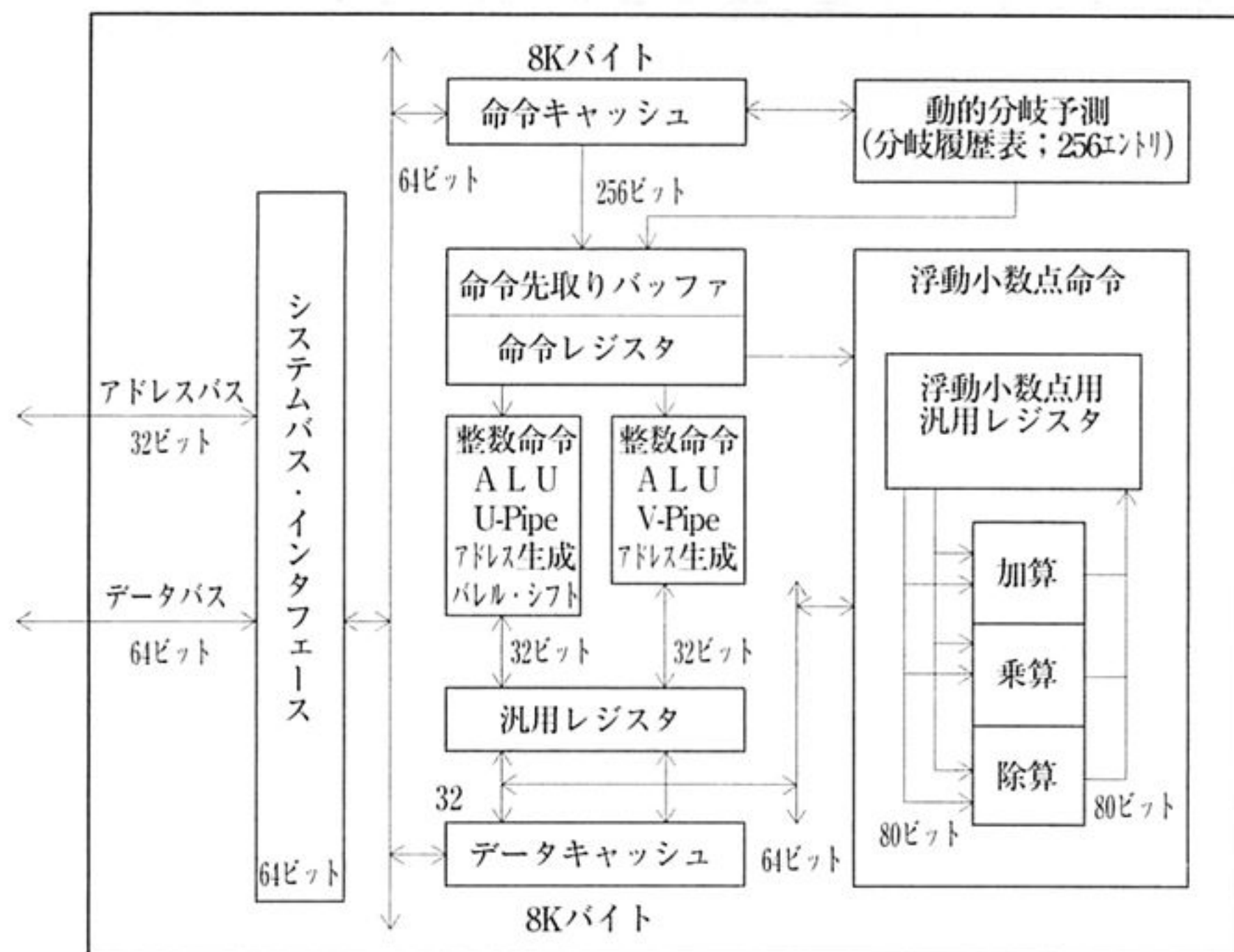
マイクロプロセッサの権利は、マイクロコードによる知的財産権と特許によって守られている。しかし、新規に異なったマイクロコードを開発し、特許を使用しない、または特許を持っている会社に製造を委託すれば、互換マイクロプロセッサの製造と販売に何らの障害もなくなる。

マイクロプロセッサを実現する論理方式は、8080における論理素子と配線によって論理を作り上げるハードワイヤード論理方式から、8085で新たに採用したROMに似た一様の構造を持つPLA（プログラマブル・ロジック・アレイ）というハードウェアとソフトウェアの両方を使ったPLA論理方式へと進展し、8086ではマイクロ命令を使ったマイクロプロ

グラム論理方式へと進化した。そのプログラムをマイクロコードという。
互換マイクロプロセッサを開発するためには、オリジナルのマイクロプロセッサとは異なるマイクロ命令を持ったマイクロアーキテクチャを開発しなければならない。すなわち、マイクロ命令そのものをオリジナルなマイクロプロセッサと似かよったものにすると、わずか数ステップのマイクロコードの場合では、新規なマイクロコードであっても限りなくオリジナルと似てしまう。
マイクロコードの知的財産権は、一九八四年十二月のインテル対NECの著作権紛争の裁判を通して確立した。著作権紛争は、NECが開発した8086と互換性があるV30に内蔵したマイクロコードがインテルの8086の著作権を侵害していないことの確認を求め、NECがインテルを提訴したことから始まった。直ちに、インテルも逆提訴で応戦した。裁判は、マイクロコード自体が著作権で守られる著作物かという点と、V30のマイクロコードがインテルの著作権を侵しているかという点で争われた。
五年後の一九八九年二月に下りた判決は、インテルのマイクロコードは米国の著作権法で保護されている、しかし、NECのV30のマイクロコードはインテルの著作権を侵していない、であった。また、インテルは権利保護を受けるための必要最小限の努力を8086に対して実施しなかったため、8086のマイクロコードの著作権を喪失したことが判決で明瞭になった。

裁判が長期間にわたった理由の一つに、NEC側の書類の不備があった。米国においては、開発に当たって技術者にデザインノートが渡される。新規な方法を見い出したときや、重要なプロジェクトでの鍵となったことを書き留めるノートブックである。V30に関しては開発者が手で書き留めたノートブックや書類がなかなかインテル側に提示されなかった。この紛争が教えることは、「創造的開発をする場合は必ずその経過を書き記し、必要があれば特許を申請しなければ権利は守れません」ということである。権利を守るための書類ではなく、権利を主張できる書類作りが大切である。

インテルのマイクロプロセッサと互換性があるサイリックスとネクスジェンのマイクロプロセッサでは、インテルが保有するマイクロコードを使わずに独自に開発したマイクロアーキテクチャによって開発したマイクロコードを使っている。したがって、この二社の製品ではマイクロコードの著作権に関しては問題がない。マイクロアーキテクチャが異なり、さらにマイクロコードが異なれば、同じプログラムを実行させると、機能は全く同じだが内部の動きが違うので、個々の命令に要する時間が異なりプログラム実行時間も違ってくる。

AMDが開発した486互換マイクロプロセッサには二種類ある。一つはインテルが開発したマイクロコードを利用したチップ、一つはAMDが独自に開発したマイクロコードを使ったチップ。80286まではインテルはAMDにセカンドソース権を技術交換契約の下で渡し、

（Pentiumのブロック図）

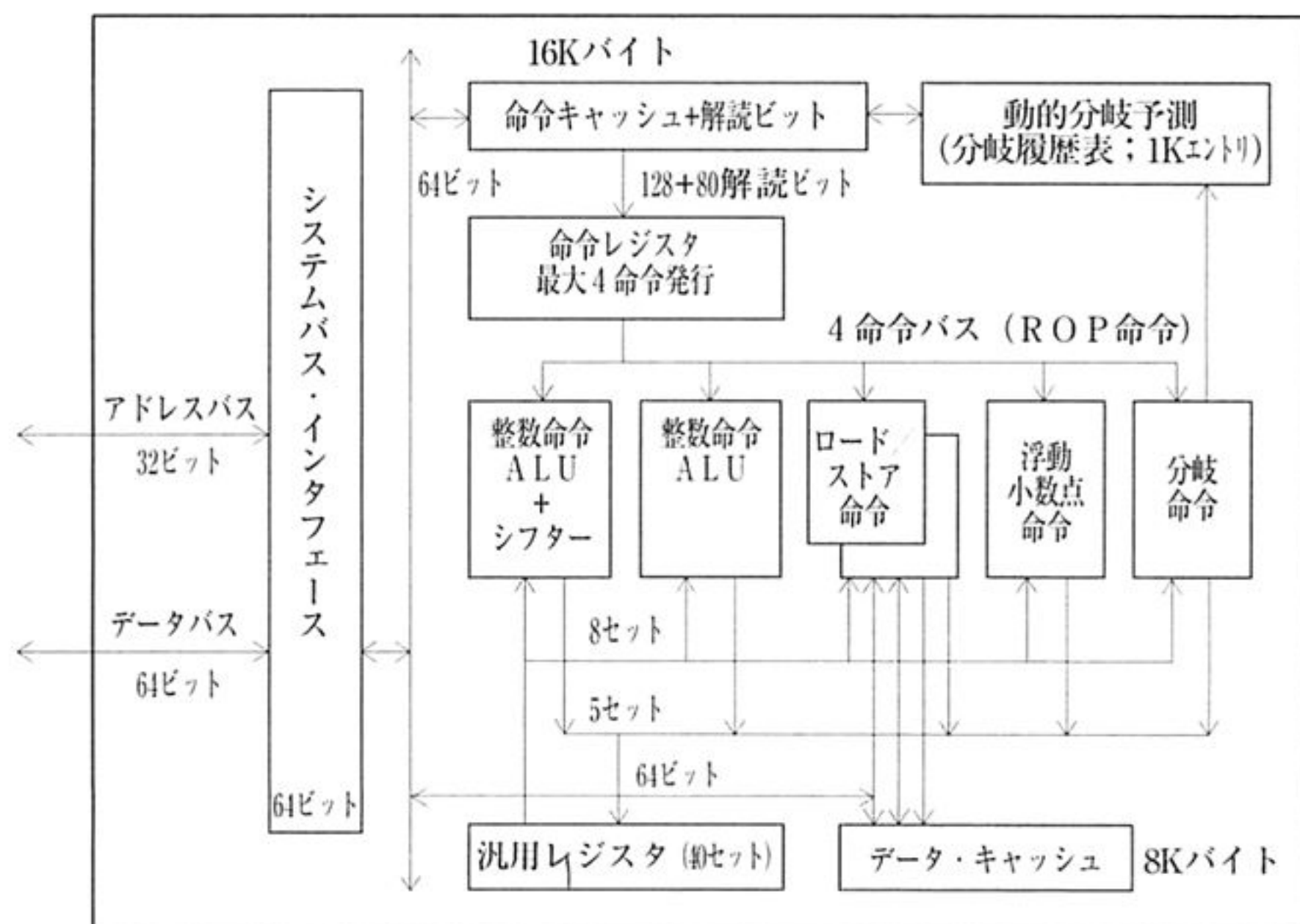



図4－2　AMDのPentium互換プロセッサK5のブロック図

PC／AT用マイクロプロセッサの量の確保と、80286そのものの販売促進を行った。80286のアーキテクチャを市場に浸透させることが当時のインテルの方針だった。ところが、386でインテルは一方的にセカンドソース契約を中止しようとした。AMDは80286以降のマイクロプロセッサのマイクロコードを使う権利が存在することを主張して、裁判が始められた。一九九五年一月十一日に和解が成立し、AMDは386と486のマイクロコードの使用権とメモリ管理に対する特許の使用権を得た。

顧客に合った製品の提供

4004の発明以来、インテルは非常に多くの優れたマイクロプロセッサを世に送り出したが、そのほとんどが市場から消えてしまった。4004、8008、8080、8085、8088、8086、80186、80286などである。386や486の高集積版386SLも486SLも製造中止となった。いずれ、386や486DXや486SXも数年以内に製造が中止されるだろう。

一方、モトローラは今でも6800や68000ファミリーを製造だけでなく開発もしている。68000ファミリーの68349はゼネラル・マジック社のOSであるマジック・キャップ対応のマルチメディア用マイクロプロセッサとして開発された。「はじめに」で述べたように、マイクロプロセッサは人類に与えられた「知への道具」である。大きな利益が期待できないから製造を中止する、独自のマイクロコードであっても知的財産権で訴える。そういうわ

がままを許さないためにも、独自に開発したマイクロプロセッサを応援することも重要である。それはまた、マイクロプロセッサの健全な発展へと結びつき、ユーザーにとって最適のコンピューティングパワーがユーザーに解放される近道でもある。

インテルの386ではメモリ保護に関して特許が成立している。その特許を避ける方法がある。ところが、特許の文章の解釈が難しい。日本人の解釈とアメリカ人の解釈が全く違う場合が多い。裁判になれば最後の判決までに何年かかるかわからない。

また、サイリックスもネクスジェンもインテルの特許を保有していない。ところが、IBMやTIはインテルのメモリ保護に関する特許をクロスライセンス契約として取得している。したがって、インテルのマイクロプロセッサと互換性があるマイクロプロセッサを受託生産することは問題とならない。このため、サイリックスとネクスジェンはIBMに生産を委託している。もっとも、サイリックスとネクスジェンの両社は、IBMが持つ非常に優れた半導体プロセスとパッケージ技術を使って高性能を実現できる高動作周波数の製品を得られるメリットもある。最近では、マイクロプロセッサの命令自体にも特許が申請され成立している。創造的な開発と特許の取得がより重要となってきた。

インテルが486の次機種の名前に586の代わりにペンティアムと名付けたのは、互換チップメーカーにとってみれば、IBMパソコン用マイクロプロセッサは自由市場になったこと

を意味する。高性能と高コストパフォーマンスと顧客に合った製品を提供する会社が残るようになる。

互換マイクロプロセッサの開発時の考え方の違いと特徴

サイリックス社は一九八八年に設立された、工場を持たないファブレスの半導体会社である。浮動小数点演算コプロセッサ８０２８７や８０３８７の互換チップを開発し販売していて、高性能マイクロプロセッサを開発できる下地があった。サイリックスは４８６ＤＸとは何かと考え、結論は最短命令が一クロックで実行できるマイクロプロセッサである、であった。

最初の製品名はＣｘ４８６ＳＬＣで、３８６ＳＸシステムバスに強力な４８６プロセッサと一Ｋバイトの一次キャッシュを搭載した。性能は３８６ＤＸの一五〜三八％増しであった。誰もが待っていたマイクロプロセッサであったので、一九九三年に約二百万個ほど売れた。

ＩＢＭはインテルから３８６のマイクロコードの使用権を得て、３８６ＳＬＣと倍速プロセッサである４８６ＳＬＣ２を開発した。同一動作周波数で、３８６ＳＬＣの性能は３８６ＳＸの約二・五倍、４８６ＳＬＣ２は４８６ＳＸより約三〇％ほど速い。どうして、それほどの高性能が実現できたのか不思議に思われるかもしれない。そこがコンピュータ会社と半導体会社の違いである。

コンピュータ会社には性能を分析し評価するグループがあり、ＩＢＭでは、開発に当たって

実際に使われているソフトウェアを動作させ、命令がどのように実行されているか、プログラムの動的動作解析を行った。解析されたソフトウェアには、オペレーティングシステムであるPC－DOS、ウィンドウズ、OS／2、UNIX、言語のコンパイラ、アプリケーションソフトウェアであるワードプロセッサ、表計算、グラフィックス、などであった。

解析後、性能向上のため重要な命令の実行クロック数を減少させる作業に入った。それらには性能に大きな影響を与える、データ転送命令、分岐命令、ブロック転送とウィンドウズに必要ないくつかの保護命令などがあった。さらに、性能向上と消費電力に大きな影響を与える一次キャッシュの容量を八Kバイトから一六Kバイトに増大させた。

パソコンにとっては性能が出なかったペンティアム

ペンティアムでは内部のハードウェアアーキテクチャが大改良され、新機能の追加がなされた。性能向上のために、①六四ビット幅データバス、②ハーバードアーキテクチャ方式のそれぞれ八Kバイトの容量を持つライトバック・データ・キャッシュと命令キャッシュ、③同時に二つの整数演算を実行するスーパースカラ方式、④分岐予測用の二五六エントリの分岐予測バッファ（ブランチ・ターゲット・バッファ）、⑤ページングサイズの増設、⑥TLBのエントリ数の増大（命令用に三二セット、データ用に六四セット）、⑦浮動小数点演算命令の大幅な強化、などが採用された。

また、オフィスコンピュータ分野へ入るべく、信頼性向上のために、⑧外部のシステムバス

のみならず、内部の一次キャッシュやマイクロコードを含む全てのメモリにパリティチェック機能を増設し、⑨フォールト・トレラント機能を組み込んだ。さらに性能を向上させるために、⑩ペンティアム用に最適化されたコンパイラを開発した。

一〇〇MHz版のペンティアムP54Cのスペックマーク値による整数命令の性能は、量産普及型ワークステーション用RISCプロセッサであるサンのSuperSPARCやHPのPA7100、IBMのPowerPC601と比較して互角である。ただし、設計のでき具合を公表されたスペックマーク性能値を使って、動作周波数当たりの性能と消費電力当たりの性能で評価すると、同じようにスーパースカラ技術とBiCMOSプロセスを使って一年以上前に開発されたSuperSPARCより悪いことがわかる。

ところで、一〇〇MHz版P54Cの外部システムバスの動作周波数は六六MHzである。プロセッサの内部動作周波数の上昇分と等しく、スペックマーク値が大きくなっているので、外部メモリへ頻繁にアクセスするビジネス用アプリケーションではスペックマーク値を性能評価値として使えないことがわかる。現時点では、一〇〇MHzの新型P54Cは、ウィンドウズNTを使ったワークステーション用に開発されたマイクロプロセッサであって、ビジネスアプリケーション用に開発されたマイクロプロセッサではない。

ペンティアムのPC/AT互換パソコン用マイクロプロセッサとしての魅力は非常に乏しい。

パソコン上で使用する頻度の高いアプリケーションは、ワードプロセッサと表計算とDTPなどの一次キャッシュへのヒット率があまり高くなく、外部メモリにアクセスする頻度が大きい、ビジネス用アプリケーションである。同一の六六MHzの動作周波数で486DX2と比較すると五九%ほど性能が高いだけに止まってしまった。

　また、ペンティアムを利用した486ソケットに互換のオーバードライブプロ

	Pentium					486			
	P54C				P24T	DX4	DX2	DX	
動作周波数 (MHz) プロセッサ システムバス	 100 66	 66 66	 66 66	 66 33	 83 33	 100 33	 66 33	 33 33	 33 33
データバス幅（ビット）	64	64	64	32	32	32	32	32	32
バスのウェイト数	0	0	1	0	0	0	0	0	1
1次キャッシュ（バイト）	16K	16K	16K	16K	32K	16K	8K	8K	8K
性能 SPEC int 92 SPEC fp 92	 100 81	 67 62				 51.4 26.6	 32.4 16.1	 19.5 8.9	
Auto CAD		100	91	82					
Excel Word Processor Spread Sheet DTP / Windows Manager		100 100 100 	80 	66 			 63 69 	 39 42 100	 92
SYSmark 93					274	250	181	122	
バス占有率 (%) Auto CAD Excel DTP / Windows Manager		 28.7 52.7 					 70	 43	 52
一次キャッシュヒット率 命令 データ	 89.6 % (Auto CAD), 84.0 % (Excel) 94.4 % (Auto CAD), 83.8 % (Excel)					 84% (DTP,Windows - Mgr) (486 DX / DX2) 88% (DTP,Windows - Mgr),Read (486 DX / DX2)			

注1.　Auto CAD, Excel, Word, SpreadSheet,DTPの性能は相対値
注2.　遅いメモリを使用すると性能の低下が激しい。P54CのSPEC mark評価値が高いのは、評価プログラムの殆どが1次キャッシュに格納されているから。Auto CADのバス占有率を見ても、1次キャッシュのヒット率が高いことが分かる。486DX4ではDX2におけるバス占有率が高いので、性能低下を抑えるために1次キャッシュの容量を倍増させている。

図4－3　X86プロセッサの性能比較

セッサＰ２４Ｔが開発され、一九九五年に登場する。内部のマイクロプロセッサの動作周波数を八三ＭHzにし、三三ＭHzで動作する三二ビットの外部データバスを採用している。エクセルなどの表計算アプリケーションにおけるペンティアムのバス占有率が五二・七%もあったので、三二ビットのデータバスの採用による性能の低下を防ぐために、内部の一次キャッシュの容量を三二Ｋバイトに増大している。バスの占有率が高いと、バスに余分の負担をかけると性能の低下がより激しくなる。

　ところが、パソコンのシステムの性能を計るシスマーク93で比較すると、Ｐ２４Ｔ：二七四／八三ＭHz、４８６ＤＸ４：二五〇／一〇〇ＭHz、４８６ＤＸ２：一八一／六六ＭHz、４８６ＤＸ：一三四／三三ＭHz、となる。Ｐ２４Ｔの動作周波数当たりの性能は、４８６ＤＸ２よりわずか一四%しか優れていない。外部メモリへのアクセスが性能のボトルネックになっている。

　現在パソコンに搭載している４８６ＤＸやＤＸ2を、Ｐ２４Ｔオーバードライブプロセッサで置き換えれば大幅な性能向上が図れるが、同じ性能を低価格で得たい一般のパソコンユーザーは、消費電力が低く製造コストが低い４８６ＤＸ4のオーバードライブプロセッサを利用した方が得策である。この製品はＡｕｔｏ　ＣＡＤのように、三二Ｋバイトの一次キャッシュのヒット率が高く、外部メモリへのデータアクセスもあまりなく、かつ高速の浮動小数点演算命令が重要視されるアプリケーションには最適である。

量産普及型ワークステーションには最適なペンティアム

ペンティアムが狙う新しいマーケットは、HPのPA7100やDECのAlphaやIBMのPowerPCで代表されるSPECint値が一〇〇以上の性能を提供する高性能ワークステーションのマーケットであり、サンのSuperSPARCで代表されるSPECint値が六〇位の性能を提供する量産普及型ワークステーションのマーケットである。このマーケットは分散処理とマルチプロセッサが可能なウィンドウズNTが普及すると、市場規模は年間

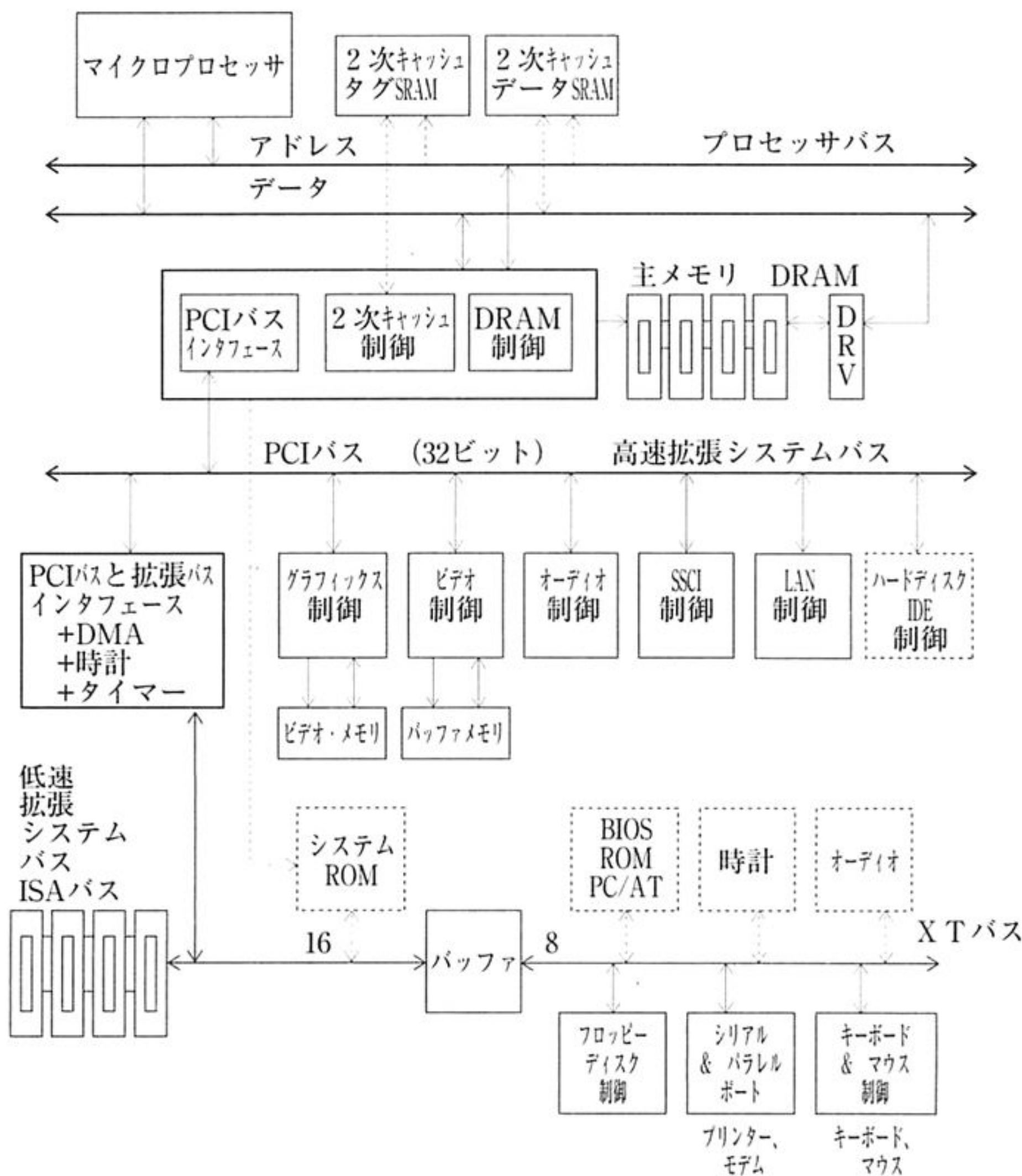



図4－4　次世代のシステムのプラットフォーム

で約四百万台位になる。

Ｘ８６系アーキテクチャの成功は、ＰＣ／ＡＴ互換パソコンのインフラ整備があったからである。今回も、ウィンドウズ３・１用パソコン自体と既存の一六ビット用アプリケーションソフトがウィンドウズＮＴ用ワークステーションのインフラとなる。それによって、Ｘ８６はＵＮＩＸに取って代わって市場の大半をとり、非常に大きなウィンドウズＮＴワークステーションのマーケットが自動的に形成される。そこで、サードパーティーがウィンドウズＮＴ用アプリケーションソフトウェアを開発、さらに大きな新ビジネスが形成される。

また、ペンティアムを使ったサーバーは、一九九四年でも年に約五十万台ほど売られた。一九九六年に出荷予定のマルチプロセッサと分散処理に対応するＣａｉｒｏ版ウィンドウズＮＴが登場すると、サーバー市場での市場占有率がより高まる。マルチプロセッサ機能を使って二個のペンティアムを搭載すれば、性能は一個と比べて約七〇％ほど向上する。

浮動小数点命令のスペックマーク値による性能の比較を量産普及型ワークステーションで行うと、ペンティアムは、ＰｏｗｅｒＰＣやＰＡ７１００には負けるが、大きな市場占有率を確保しているＳｕｐｅｒＳＰＡＲＣより少し優れている。消費電力当たりの性能はプロセッサによる違いは大きくないが、ワークステーションにとって重要な浮動小数点演算ユニットの設計のでき具合を動作周波数当たりのＳＰＥＣｆｐ値を使って評価すると、ＳｕｐｅｒＳＰＡＲＣ

やＰＡ７１００やＰＰＣ６０１と比べて非常に悪い。また、ペンティアムには高性能浮動小数点演算に関しての技術が蓄積されていないことがわかる。ペンティアムの量産普及型ワークステーション用プロセッサとしての技術的な評価は、平均的仕上がりと言って良いだろう。

性能向上へのスーパースカラ技術

スーパースカラ技術に基づいたマイクロプロセッサは、①命令の解読と解読された命令を各実行ユニットへ発行するユニット、②メモリとのデータの読み書きの命令を実行するロード／ストアユニット、③分岐履歴表（ＢＨＴ）と分岐先アドレスキャッシュ（ＢＴＡＣ）による分岐予測機能を持った分岐を実行するユニット、④整数命令を実行するユニット、⑤浮動小数点命令を実行するユニット、⑥命令とデータのキャッシュ、⑦システムバス・インタフェース、により構成されている。

各実行ユニットには、配分された実行予定の命令を一時的に保持するリザベーションステーションと名付けられたバッファが用意されるようになった。リザベーションステーションの採用により、速く終了する命令と時間のかかる遅い命令との時間的な調整をしたり、命令を次から次へと解読し発行させることも可能となった。

さらに、各実行ユニットで実行された結果をプログラムで指定された順序で指定されたレジスタに格納し命令を終了させていくコンプリージョンユニットがある。この機能は、プログラムの実行中に例外事項が発生したり、予測した分岐先と異なる分岐が発生したときに、既に実

行されたプログラムを必要な時点で停止させるために使われる。
スーパースカラ技術を評価するのにいくつかの項目がある。①命令発行能力：同時にいくつの命令を解読し発行できるか。②実行ユニット数：同時にいくつの命令を実行できるか。③分岐予測の正確さ：過去の分岐履歴を保存することで、次の分岐が成立するかしないかを予測し、分岐すると予測されたときには、あたかも分岐があったようにプログラムの流れが変更される。
分岐予測には静的分岐予測と動的分岐予測がある。静的分岐予測では、コンパイラで予測した分岐方向を命令内の分岐ビットに書き込む。実行時に命令内の分岐ビットに従い分岐を行う。一方、動的分岐予測では、実際に分岐が行われたときの履歴を分岐履歴表に格納しておく。分岐命令が解読されると分岐履歴表を調べて分岐予測をする。この分岐履歴表は大きい方が性能が高くなり、一般的には五一二〜二Kエントリー分ある。
分岐すると決定されると、分岐先のアドレスが必要となり、そのアドレスを格納しているのが分岐先アドレスキャッシュである。分岐履歴表分のアドレス情報を格納しようとすると、非常に大きなメモリが必要となる。そこで、一般的に六四〜二五六エントリーのキャッシュが使われている。
④スペキュラティブエクゼキューション：予測した分岐に従い、危険を覚悟で確立の高い分岐後の命令群を実行する。実際の分岐が予測と違うときは実行前の状態に戻す。一六〜三二段

のバッファを持っている。⑤先行命令制御（アウトオブオーダー）実行：命令の実行順序を動的に変更することにより、実行ユニットの空き時間をなくしパイプラインの乱れを防ぐ。例外処理が途中で起きたりするので、演算結果はプログラムの順序に従い格納される。⑥レジスタリネーム：先行命令制御やレジスタリネーミング機能を持つことにより、先行する命令の終了を待たずに命令が実行される。マイクロプロセッサの内部の命令でアクセスする、固定された少ない数の論理的なレジスタを大きな物理的なレジスタ群でエミュレートする方法。ペンティアムの汎用レジスタ数はわずか八個しかないので、レジスタ間での衝突が頻繁に発生し、その度ごとにパイプラインが停止して性能が低下する。レジスタリネーム機能は、スーパースカラ技術を採用し、いくつかの命令を同時に実行したり、スペキュラティブエクゼキューションを行うときに使用される。

ペンティアムで採用されたスーパースカラ技術は、①命令の発行数は最大二つ、②命令の実行ユニットとして、分岐機能とロード／ストア機能を含む二つの整数命令実行ユニットと一つの浮動小数点命令実行ユニットを持ち、③動的分岐予測機能を有し、分岐先バッファ（BTB）と名付けられた二五六エントリーの過去の分岐したときの履歴と分岐先アドレスを含んだ分岐履歴表を持っている、などである。

最新のスーパースカラ技術であるレジスタリネームやスペキュラティブエクゼキューション

や先行命令制御などは採用していない。また、解読された命令の発行に関しては、レジスタ間での衝突が生じない条件下で整数命令と分岐命令を二つ同時に発行できる。ただし、組み合わせは、整数命令と整数命令、または整数命令と分岐命令、となり、浮動小数点命令は整数命令や分岐命令と組み合わせては発行できない。

さらに、アドレス指定方式でディスプレースメントやイミディエイトなどの命令内のデータを要求する命令は、単独でしか発行できない。したがって、二つの命令を発行し実行するとは言うものの、命令の組み合わせに制限があり過ぎ、実際には限られた組み合わせでしかスーパースカラ技術の良さが発揮できなく、実際のCPI（一命令の実行にかかる平均クロック数）は約一・四〜一・七位となる。約三百十万個のトランジスタを使って、さらにスーパースカラ技術を導入した割りには、ペンティアムの性能は期待した程度とはほど遠い、物足りないできであった。

ペンティアムより約一年前に開発されたサンのワークステーション向けRISCプロセッサSuperSPARCのスーパースカラ技術は、ペンティアムより一段と高いでき具合である。したがって、消費電力当たりの性能もSuperSPARCの方が約五〇%ほど優れている。

第2節

IBM系PowerPCプロセッサの現在と将来

IBM、アップル、モトローラの提携

マイクロプロセッサを開発している会社で、今一番元気なのがIBMである。一九九一年十月二日にIBMとモトローラとアップルの三社提携による基本計画が発表された。基本計画とは、「コンピュータとパソコンと半導体の三つの業界を代表する三社がパートナーシップの下で、既存の製品との互換性を保ちつつ、オープンシステムズを必要とする全てのシステムメーカーに、新世代のRISCプロセッサPowerPCと、OSや言語やアプリケーションなどのソフトウェアを提供する」、であった。

具体的には、PowerPCをマイクロプロセッサに使い標準のプラットフォームPReP(Power PC Reference Platform)システムで、マッキントッシュ(マックOS;システム7)とIBMパソコン(ウィンドウズ3・1、ウィンドウズNT、OS/2)とIBMのUNIXシステム(AIX)上のアプリケーションソフトウェアを動作させることである。そのためにも、右記のOS群の上に新たに開発するワークプレースOSを配置する予定である。

IBMはビジネス用パソコンIBM・PC/ATで、モトローラはワークステーションとマ

ッキントッシュパソコンに広く使われたマイクロプロセッサＭＣ６８０Ｘ０で、そしてアップルは本格的なウィンドウ機能を持つシステム７オペレーティングシステムを搭載したマッキントッシュで、それぞれ一時代を築いた。しかし、ＩＢＭは「オープンシステムズ」と「既製標準品の使用」の採用によりＰＣ／ＡＴ互換パソコンの台頭を許し、パソコンの低価格競争ではコンパックに、マイクロプロセッサではインテルに、ＯＳではマイクロソフトに、ビジネスだけでなく次世代製品の開発の主導権も取られてしまった。

ＩＢＭにとっては、それらの主導権を取り戻すために、自ら開発した独自のアーキテクチャに基づいたマイクロプロセッサとシステムのプラットフォームとＯＳの確保が必須であった。モトローラのＣＩＳＣプロセッサ６８０Ｘ０は、ワークステーション市場をＲＩＳＣプロセッサに奪われ、６８０４０の後継機種６８０６０では約三・五倍の性能が期待できるものの、十年後のマッキントッシュに飛躍的なコン

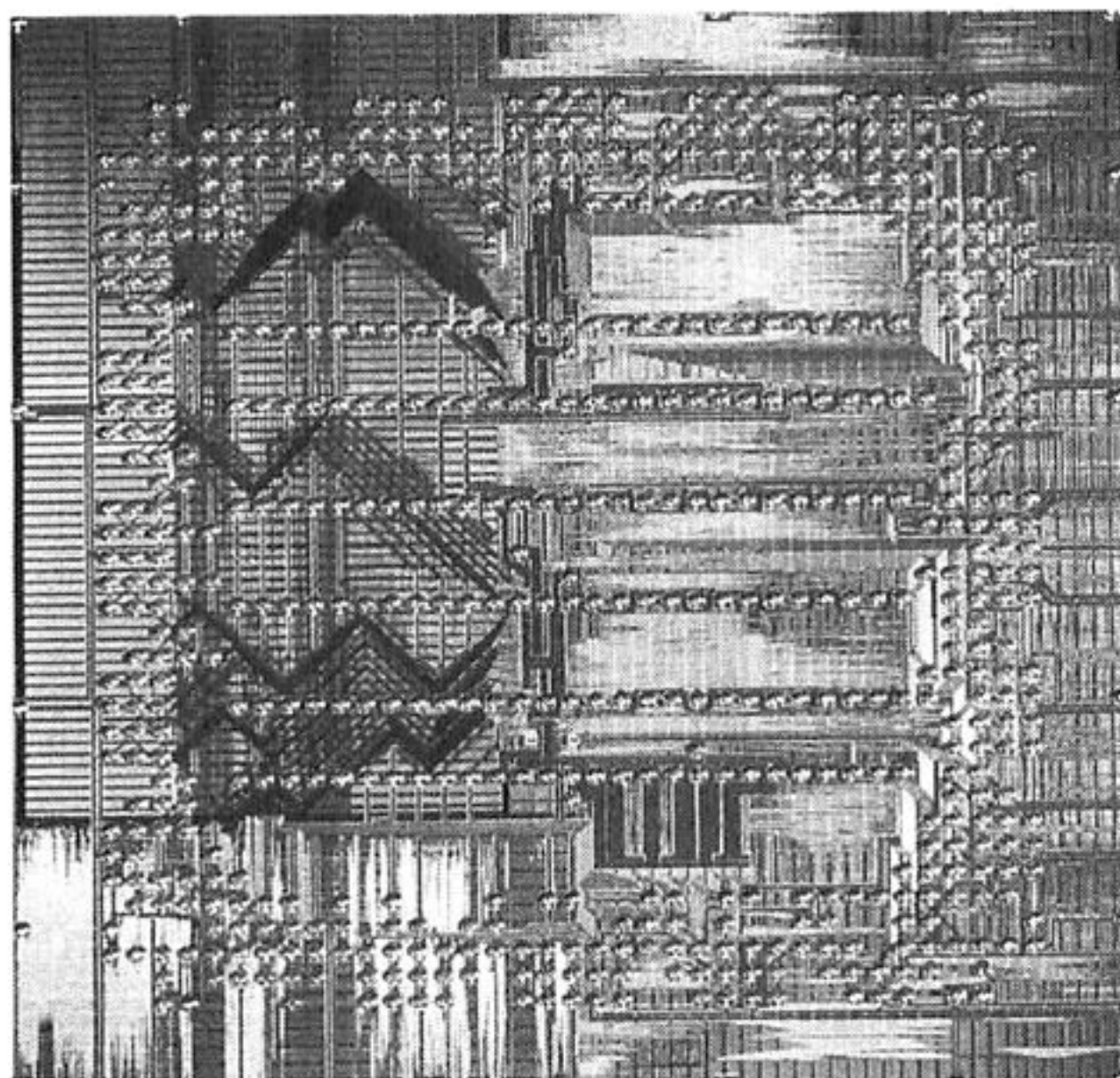



写真4　PowerPC プロセッサ（提供：日本IBM(株)）

ピューティングパワーを提供するのは難しい。

また、88110という技術的には非常に優れたRISCプロセッサを開発したが、自動車のエンジン制御用高性能コントローラとしての商品化に躊躇していた。アップルにとっては、システム7によるマッキントッシュ文化を広げるためには、超高性能パソコンから携帯情報端末機器まで同じアーキテクチャで統一され（スケーラブルアーキテクチャ）、コストパフォーマンスが高く消費電力当たりの性能が高いマイクロプロセッサシリーズと、システム7を搭載するシステムのプラットフォームが必要であった。

予定通りに開発されたPPC601

PowerPCアーキテクチャの基本をまとめると次のようになる。

①バイエンディアンマシンであること。IBMパソコンに採用されているウィンドウズ3・1とNTにおけるバイトデータのメモリ内での配置の仕方は、リトルエンディアン（データがメモリアドレスの小さい方から並ぶ方式）であり、UNIXやシステム7はビッグエンディアンで逆になっている。

②コンパイラやアプリケーションの重要性から抽出した命令の新設。

③高動作周波数とチップサイズの縮小化のために、POWERの命令アーキテクチャから複雑な命令を削除。ただし、POWERシステムからの容易な移行のために、削除した命令ではトラップ（異常事態の検出による分岐）を起動させソフトでエミュレーションする。この方法

でＰＯＷＥＲシステムのアプリケーションソフトウェアを何の変更もせずに利用できる。
④グラフィックス、ＬＡＮやハードディスクとメモリ間における大容量データの高速転送のために、高効率なシステムバス（高帯域バス幅：ハイバンド・バス・ウィドゥス）の採用。
⑤より高い性能を得るためのマルチプロセッサ機構の採用。
⑥トランジスタ数が非常に多くなるので、高い信頼性を達成するためのパリティチェックをシステムバスだけでなく、内蔵のキャッシュメモリにも採用。
⑦六四ビットのアーキテクチャへの拡張。
ＩＢＭとモトローラとアップルが共同して計画したＰｏｗｅｒＰＣプロセッサシリーズの最初のマイクロプロセッサがＰＰＣ６０１である。ＰＰＣ６０１は、ＩＢＭが開発したシングルチップ版ＲＩＯＳプロセッサの設計データを使って開発され、約束通り一九九二年に完成した。八〇MHzの動作周波数で、整数命令で八五ＳＰＥＣｉｎｔ、浮動少数点命令で一〇五ＳＰＥＣｆｐの性能を達成し、一九九三年に登場したペンティアムよりも高性能だった。
ＰＰＣ６０１の一次キャッシュを除いたマイクロプロセッサ本体に使用したトランジスタ数は約百十万個で、一方ペンティアムは約二百二十万個であった。また、三二Ｋバイトの一次キャッシュを持つＰＰＣ６０１のチップサイズは、百二十一平方ミリと、一六Ｋバイトの一次キャッシュしか持たない新型のペンティアムＰ５４Ｃの百六十三平方ミリと比較しても二六％ほ

ど小さい。チップのレイアウトを比較しても半導体会社のものより美しく、よほど優れたＣＡＤと設計力を持っていると推測される。

素晴らしいコンピュータ会社の技術力

ＰＰＣ６０１はマッキントッシュのＰｏｗｅｒＭＡＣ版として使用されている。一九九四年に約八十万台販売され、一九九五年には二百万台、将来的には四百～五百万台の販売が予想されている。また、マッキントッシュのＯＳであるシステム７がＰｏｗｅｒＰＣを搭載したパソコンに外販される予定がある。これらを考慮に入れると、パソコンの約二〇～三〇％の市場をＰｏｗｅｒＰＣプロセッサが確保する。

ＰｏｗｅｒＰＣ用のウィンドウズＮＴはＰｏｗｅｒＰＣの命令そのもの（ネイティブモード）で動作する。ＰｏｗｅｒＰＣはマッキントッシュの上位機種としても使用されるように計画された。ＰｏｗｅｒＰＣはそのネイティブモードを使用すれば高い性能が発揮できる。マッキントッシュのシステム７の性能上重要な箇所はネイティブモードを使用して書き直されている。また、重要なアプリケーションソフトウェアも順次ネイティブモードを使用して書き直されている。

ところが、アプリケーションソフトウェアの内でネイティブモード（ＰｏｗｅｒＰＣの命令そのもの）に移植されていないものは、エミュレーションをする必要がある。ＤＥＣ社のＡｌ

phaを使ってx86をエミュレーションしたところ、期待通りの性能が達成できなかった。
一方、PPC601を使ってマッキントッシュに使われているモトローラの68040をエミュレーションしたところ、PPC601の二五%ほどの性能が出た。一〇〇MHzのPPC601の性能は68040の約十倍であるので、結果的にはPowerMACの性能は68040を使ったマッキントッシュの二・五倍の性能が達成できた。
PPC601を使ったエミュレーションでは極端な性能低下が起きないのは、マイクロプロセッサ内部の一次キャッシュメモリの構成と容量、命令の発行数、スーパースカラの性能、パイプラインの段数、ビットフィールド命令などのアーキテクチャの違いによる。
また、Alphaの命令があまりにも簡単すぎるのもエミュレーションの性能を上げられない理由の一つだろう。PPC601の一次キャッシュは、容量が三二Kバイトと大容量で、キャッシュが一度に読み書きできるブロックの大きさであるラインサイズが六四バイトでヒット率が高くなり、連想方式のWay数が八となっており八セットの内のどれか一つを選択できるのでヒット率が高くなっている、ただし命令とデータが一緒になっている。しかし、命令とデータを一緒にしたため、エミュレーションに必要な変換テーブルを大きく確保でき、マッキントッシュに使われているモトローラ68040をエミュレーションする時の性能を高めることができた。

さらに、読み出したデータを演算し、その結果を書き戻すリード・モディファイ・ライト(Read—Modify—Write)オペレーションが一クロックと、高速動作が可能になっている。この高性能なキャッシュの搭載により、非常に高いヒット率と共に、外部メモリへのアクセスの頻度が減少し性能向上に貢献するだけでなく、エミュレーション時における68040の命令をPowerPCの命令に変換するのに大いに役立っている。

ところで、外部のメモリへのアクセスは三二バイト単位で行われるが、システムバスがアイドル状態になると、次の三二バイトが自動的にアクセスされ、一次キャッシュに格納される。この機能もまた性能向上への一つの手段である。命令の解読ユニットには八命令分の命令のキュー(バッファ)があり、下位の四命令の命令ウィンドウから三つの命令を取り出し各実行ユニットに実行予定の命令を発行する。

実行ユニットには、整数命令実行ユニット、分岐命令実行ユニット、浮動小数点命令実行ユニットがあり、最大三命令が同時に実行できる。分岐予測は静的分岐予測で、分岐予測機能を持つことによりあたかも分岐がなかったように、実行クロック数が「〇」として分岐命令が実行される。

PowerPCのパイプラインの段数は固定されておらず、分岐命令で二段、ロード/ストア命令で五段、整数命令で四段、浮動小数点命令で六段と、各々の命令の必要度に合わせて最

適化されている。この最適化されたパイプラインにより分岐が生じた時の対応が早い。パイプラインが浅いと約六命令で一回は分岐が生じるオペレーティングシステムや、エミュレーションの性能向上に非常に大きな貢献をする。パイプラインの段数を減少させるのが最近のRISCプロセッサの傾向である。

毎年新機種を発表できるIBMの開発力の凄さ

二番目に登場したPPC603は、IBMとモトローラが最初から開発したマイクロプロセッサで、最初はノートブックパソコンに使用される予定である。約束通り一九九三年に完成した。PPC603の内蔵の一次キャッシュは一六Kバイトと小さいが、ロード/ストアのユニットを新たに追加したりしてアーキテクチャ的に大幅な性能向上を実現した。

八〇MHzの動作周波数で、整数命令で七五SPECint、浮動少数点命令で八五SPECfpの性能を達成し、同一動作周波数ではペンティアムと同等の性能である。トランジスタ数は百六十万個で、チップサイズはわずか八十五平方ミリでペンティアムの半分の大きさである。消費電力もわずか三ワットと非常に小さいので、将来的にはPPC601を置き換えていくだろう。

さらに、デスクトップパソコンの上位機種やサーバーに採用予定のPPC604も予定通り一九九三年に完成し、「ペンティアムキラー」として位置づけられている。一〇〇MHzの動作

周波数で、整数命令で一六〇SPECint、浮動少数点命令で一六五SPECfpの性能を達成し、同一動作周波数ではペンティアムの一・六倍以上の性能で、浮動小数点命令では約二倍の性能があり、高性能ワークステーションとしても十二分に使える性能である。トランジスタ数は三百六十万個で、チップサイズは百九十六平方ミリでペンティアムより二〇％ほど大きい。

再度ホームマーケットへ挑戦か

一九九四年、IBMとモトローラはPowerPCの命令アーキテクチャに準拠した制御用コントローラとして、それぞれPPC403GAとMPC505を開発した。性能は486DX4とほぼ同じで、ソニーのプレイステーション・ゲーム機に使用されたMIPS社のR3000プロセッサと比較すると、五〇％ほど性能が高い。

PPC403GAのアプリケーションは、ゲーム、携帯情報端末機器（PDA）、セット・トップ・ボックス、通信などである。マイクロウェア社のOSはPowerPCに移植されセット・トップ・ボックスに使用される予定になっている。また、3DOゲーム機のアクセレレータプロセッサとしてPPC403GAを改造したのが二個使われると予想されている。

ところで、LSIロジック社が開発を担当したソニーのプレイステーション用のR3000をベースにし高集積化したマイクロプロセッサは、現時点において最強のゲーム用プロセッサ

である。R3000に、一秒間に三十画面（フレーム）分処理可能な3Dグラフィックスエンジンと静止画（JPEG）対応のビデオ向け画像伸長用エンジンを搭載し、性能向上のために五Kバイトのキャッシュを内蔵化し、データ転送が成功への鍵となるのでシステムバスにさらにグラフィックスアクセレレータ用バスと入出力バスが追加されている。ゲーム機としては、現時点において、最も性能が高く、各種バスを含めた機能の分割と集積が最高のでき具合である。

PPC403GAにはスーパースカラ技術は使われておらず、メモリ管理機能や浮動小数点命令もなく、キャッシュも三Kバイトに減らしている。そのかわり、プロセッサそのものは一三・六平方ミリと386の半分の大きさである。システム全体のコストを下げるために、各種のペリフェラル（入出力）制御機能やメモリ制御機能が集積化されている。

一方、モトローラは自動車のエンジン制御や通信分野に強く、IBMより強力な制御用コントローラを必要としていた。フォード社のエンジン制御にはMPC500シリーズが使われると予想されている。MPC505には、PPC403GAと異なり、メモリ管理機能や浮動小数点命令があり、四Kバイトの命令キャッシュと四Kバイトのデータ用メモリを搭載している。多くのアプリケーションに最適化されたマイクロコントローラを短期間に開発するため、既に68000シリーズで開発された各種のペリフェラルモジュールが使えるようにチップ内のモ

ジュールを結ぶインターモジュールバスが設置されている。さらに、八ビットマイコンも集積化される工夫がされている。

ところで、モトローラのヒット商品である６８０００は性能に影響を与える複雑な命令を取り除き再設計され、開発コードＡＣＥとして現在開発が進んでいる。同一動作周波数を使用した場合でも性能は６８０００の約四倍、チップサイズは二・二平方ミリと６８０００の半分以下の大きさである。古くなったアーキテクチャも、古い製品との互換性を保ちつつ仕様を現代風に改革し、かつ最新の設計手法を導入すれば、強力な製品に生まれ変わることを示す参考にすべき良い例である。このマイクロプロセッサには、ゼネラルマジック社のマジックキャップＯＳが搭載される。

第3節 オープンシステムの未来

オペレーティングシステム（ＯＳ）とは

オペレーティングシステムの進展を追うと、未来のマルチメディアの姿が見えてくる。システムのソフトウェアの中で最も基本的なものは、オペレーティングシステム（ＯＳ）であると言われている。一般的には、

OSとは、「ユーザーとハードウェア、ソフトウェアとハードウェアなどの仲介役として、システム全体を管理し処理が円滑にかつ効率的に行われるように、コンピュータのいろいろの機能を制御するプログラムの集まりである」と定義されている。ユーザーの側から解釈すると、OSとは、「搭載されたシステムに期待できる、用途、種類、使い方、ヒューマンインタフェース、品質、性能、を制御するプログラム」と定義される。

オペレーティングシステム（OS）の動向について、パソコンの主流OSであるMS—DOSとウィンドウズを中心に述べる。IBMパソコンのOSは一九八一年に誕生以来、少しずつ成長してきている。OSの用途は独立型処理（スタンドアローン）から分散処理へ、種類は一六ビット型から三二ビット型へ、使い方は何もない状態からアプリケーション間通信・連携や各種ネットワークやマルチメディアへ、ヒューマンインタフェースにはキーボードからのコマンドからGUIへ、品質はドットフォントからアウトラインフォントへ、性能はシングルタスクからマルチタスクやマルチプロセッサへ、と徐々に移りつつある。

したがって、機能の誤解も生じてくる。真性（プリエンプティブ）なマルチタスクといっても、三二ビットのアプリケーション間でのマルチタスクは可能だが、一六ビットのアプリケーション間でのマルチタスクは不可能であったり、信頼性が低かったり、エラーが生じたときに復帰が不可能であったりと、完全なマルチタスクでない場合もある。

また、一九九五年に出荷予定のウィンドウズ３・１の次機種の名前がウィンドウズ95と名前が付けられたので、オペレーティングシステムのバージョンアップはこれから毎年起きるかもしれない。バージョンアップ費用は一万円位かもしれないが、アプリケーションソフトが必ずしも新しいバージョンと互換性があるとは限らないので、バージョンアップそのものだけでなく、バージョンアップによるアプリケーションソフトの不具合がないことの確認のために莫大な時間と費用がかかる。バージョンアップによる生産性向上とそのためにかかる時間とコストを考えないと痛い目に合う。

一六ビットウィンドウズ３・１の登場と三二ビットウィンドウズ95への進展

マイクロソフトのウィンドウズはMS—DOS上で動作するGUIである。ところが、現在のウィンドウズ３・１は純粋な三二ビット版OSではなく、一六ビット版OSなのである。一九九五年に出荷されるウィンドウズ95で初めて、ウィンドウズは三二ビット版OSとなる。一九八五年に三二ビットマイクロプロセッサ386が開発されて、十年後である。

現ウィンドウズは、MS—DOSで起動された後は、ファイルシステムとBIOS以外はMS—DOSの機能は使わない。ただし互換性維持のために、MS—DOSを使ったアプリケーションは、DOS互換ボックスを使って動かすことができる。

一九八五年に最初のウィンドウズ１・０が出荷されたが、ただ単にウィンドウを開けまし

た、といった程度のでき具合で、実用には程遠い製品だった。386がパソコンに初めて搭載された一九八六年末から、三年後の一九九〇年に出荷が始まったウィンドウズ3・0で初めてマッキントッシュ的なGUIが使えるようになった。

ところが、メモリのモデルとして、それぞれ一六ビットのセグメントとオフセットの組み合わせで三二ビットのアドレスを表す、セグメントモデルが使われている。したがって、アプリケーションの共有の領域であるグローバルメモリは、実際に搭載されているDRAMなどの物理メモリである主記憶メモリのサイズの限界や、ハードディスクを主記憶メモリのように見せかけた仮想記憶サイズの限界まで使えるが、アプリケーショシ固有の領域であるローカルメモリは六四キロバイトのメモリサイズしか使えない。

また、ウィンドウズ3・1の画面表示と印刷の描画に関する操作は、一六ビット版のグラフィックス・ディスプレイ・インタフェースGDI16を使って行っているので、大きな絵や高解像度の出力はできない。この一六ビットのメモリモデルを持ったウィンドウズをWin16とよんでいる。この制限により、大容量の主記憶メモリを使っても、後述するOLE機能などで「アプリケーションエラー」などの致命的な問題が生じる。

ウィンドウズNTや一九九五年に出荷予定のウィンドウズ95（Chicago）では、三二ビットのリニアなアドレスが使えるWin32とGDI32の追加により、この問題は解消さ

れる。さらに、GDI32の導入と同時に絵を回転させたり歪ませたりする機能も追加される。やっと、マッキントッシュに追いつくようになる。

一九九二年に出荷されたウィンドウズ3・1で、ウィンドウズ機能の中でも非常に重要なWYSIWYGに必要であるアウトラインフォントがやっと標準添付された。音声だけだがマルチメディア機能も標準装備された。マッキントッシュのように、ごみ箱はないがファイルの複写や削除などがドラッグ・アンド・ドロップ機能で簡単に実行でき、ハードディスク処理速度も向上した。このように、ウィンドウズの機能はマッキントッシュのGUIに限りなく近づきつつある。

アプリケーション間連携機能OLE／OpenDocとマルチメディア

ウィンドウズ3・1の機能の中で、今後のマッキントッシュを含めたパソコンにとって、最も重要な技術はマルチメディア時代に向けたオブジェクト指向のアプリケーション間連携機能のOLE（Object Linking and Embedding）やOpenDocである。

プレゼンテーション用資料、報告書、マニュアルなどの各種の書類を作成するために、最初にワープロソフトが登場し文章の入力と編集が可能となった。次に編集が自在にでき、美しい文字も使えるDTPソフトが登場し、さらにウィンドウズ1・0の登場で、文字だけでなく表計算ソフト、エクセルのグラフや絵描きソフトであるペイントブラシの絵などのグラフィッ

1984
Mac OS
1981
MS - DOS
１６ビットOS：
+GUI
+アウトライン・フォント
+ネットワーク
１６ビットOS：
コンピュータの資源管理
プロセッサ、メモリ、
ファイル、入出力
1987
OS／2 1.0
1990
Mac OS
(Sysyem7)
1990
Windows 3.0
+
MS - DOS
３２ビットOS：
+アプリケーション間通信
クリップボード
+マルチメディア
Quick Time
1992
Windows 3.1
+
MS - DOS
1992
OS／2 2.0
１６ビットOS：
+GUI
+アウトライン・フォント
+アプリケーション間連携
+マルチメディアMME
+疑似マルチタスク
３２ビットOS：
+GUI
+アウトライン・フォント
+アプリケーション間連携
+マルチメディア　MMPM／2
+真性マルチタスク
+LAN - Manager
+エミュレーション
仮想DOS
Windows 3.1
入出力
1993
Windows NT
1994
Mac OS
(System7.5)
1995
Windows 95
(シカゴ)
1995
OS／2
Warp 3.0
３２ビットOS：
+真性マルチタスク
ただし32ビット・アプリケーションのみ
+OLE2.0（アプリケーション間連携）
+ネットワーク・プロトコール
+通信、電子メール、FAX
+Plug & Play
３２ビットOS：
W95に加えて
+真性マルチタスク
+サブシステム
Win32, MS-DOS
OS/2,POSIX(Unix)
+WOW(Win16 on Win32)
Windowsのエミュレーション
+セキュリティー
+マルチプロセッサ
+Open Doc
+通信
+マルチプロセッサ
+セキュリティー
+通信
電子メール
FAX
1996
Mac OS
(ガーシュウィン)
1996
Windows 96
1996
Windows NT
(カイロ)
+真性マルチタスク
+Open Doc
+3DQuick Draw
+分散処理（OSF準拠）

図４－５　ＯＳの技術動向

クスデータを、マッキントッシュでも採用されているクリップボード経由で、他のアプリケーションソフトに貼り付けたりして使うことが可能となった。

ウィンドウズ2・0の登場により、DDE(Dynamic Data Exchange)というアプリケーション間連携機能が追加され、元のデータを更新するたびに、そのデータを使って貼り付けたデータも同時に更新されるようになった。ウィンドウズ3・1では、DDEとは別にOLEが追加され、貼り付けたいオブジェクトの作成を選択すると、アプリケーションソフトそのものが立ち上げられデータを作成することが可能となり、貼り付けたオブジェクトをマウスでクリックすると、そのオブジェクトを作成したアプリケーションソフトそのものが立ち上がり、データの編集が可能となった。このOLE機能により、文章の作成のほかに、図面、絵、音楽、効果音や会話などの音声、静止画、表やグラフ、などを自由に貼り付けることが可能となった。

次機種のOS/2オペレーティングシステムや一九九五~六年に登場予定のマッキントッシュのOSであるガーシュウィン(Gershwin)が提供するOpenDocはOLEよりも一歩進んだ機能を持っており、真っ白な紙に文章や絵やグラフや動画を自在に貼り付けたり、プログラム化したりして、デジタル書類ができる。

今までの報告書は、DTP機能を使って綺麗な書体で強調したいところを太文字で書いたりしても、平面的な肉声のない無機質なでき上がりしか期待できなかった。ところが、OLE/

写真5　マルチメディア・ドキュメンテーションの例
（提供：日本IBM（株）㊤，松下電器産業（株）㊦）

OpenDoc機能により、文字による表現だけではなく、図面、絵、音楽や会話などの音声、静止画や動画、表やグラフ、などを駆使して表現することができる。動画をクリックすればビデオで撮ったものを再生しつつ言葉を使って説明したり、図面やグラフをクリックすれば、作成したスライドを自動的に更新しつつ言葉で説明を行ったりして、報告書の説明などは人間の感性に訴えつつ立体的に行うことができる。

現段階では、動画の録画や再生にはVideo for Windowsや文章の読み上げ機能には、Windows Sound Systemなどのソフトを別途購入しなければならない。このように、多くの種類のメディアを使ってオフィスにおける作業効率を飛躍的に高めるのが、マルチメディアの有効な使い方である。ただし、それらのためには、より高信頼性が提供でき、かつ高性能なマイクロプロセッサと高速で大容量のハードディスク、3Dグラフィックスボードと大容量の主記憶メモリが必要とされるので、一段上のレベルのマイクロプロセッサを搭載した高性能なパソコンを購入しておくことが望ましい。

真のマルチタスクへ

一九九五年に登場予定のウィンドウズ95では、ローカルネットワークや電子メール（MAP1）や広域ネットワーク（TAP1）などの通信ソフトが標準装備される。これらの通信機能を利用して、最終的には情報スーパーハイウエーのような高速ネットワークを介して、リアルタイムに、かつ双方向的に、

上記のOLEやOpenDOC機能が使われる。

ところで、今までのパソコンでもいくつかのアプリケーションソフトを同時に実行できたが、アプリケーション間の切り替えはキャッチボールのようにしかできない疑似マルチタスク（ノンプリエンプティブなマルチタスク）方式で行われている。いわば、善意の人達が遠慮し合って相手のことを考えつつ自分のしたいことをするように、ウィンドウズで指定されたアプリケーションに制御が移されると、ある段階まで処理を実行した後、処理をいったん中断し、制御をウィンドウズに戻す。次にウィンドウズは要求があるアプリケーションに制御を移す、といったように、いくつかのアプリケーションを見かけ上、同時に実行しているようにパソコン全体を制御している。

しかし、何かのエラーが起き、制御がウィンドウズに戻されないと、パソコンはそこで永久に止まってしまう。一方、ウィンドウズ95では真性マルチタスク（プリエンプティブなマルチタスク）方式が採用される。ウィンドウズが制御するタイマを使って、時間単位でアプリケーションをスケジュールし、ウィンドウズによって一定の時間が経つとアプリケーションの切り替えを強制的に行う。

ウィンドウズ3・1を使った場合では、印刷をしながらワープロソフトを使うと、ワープロソフトが走ったり止まったりして、マニュアルシフトの自動車でギアチェンジをしたときの

ように、ガクガクと動く。ところが、ウィンドウズ95が採用する真性マルチタスクを使うと、オートマティックシフトの自動車を運転するように、印刷をしていることが気にならないくらい、ワープロソフトが快適に動作する。高性能なマイクロプロセッサを使うと、大排気量でかつトルクの大きなエンジンを搭載したように、非常にスムースにワープロが動く。

ただしウィンドウズ95には、一六ビットのアプリケーション用メモリが一組しか用意されていないので、真性マルチタスク機能は既存の一六ビットアプリケーションソフトウェア間では働かない。働いても、一つのアプリケーションがエラーを起こしたら、他のアプリケーションも止まってしまう。一方、OS／2では、どのような組み合わせでも真性マルチタスク機能は動作する。したがって、マルチタスク機能を使いたいユーザーにとっては、ウィンドウズ95とOS／2を比較するとOS／2に軍配が上がる。

また、OLEがより高度に発展すると、より高性能なマイクロプロセッサが要求される。OLEで図面や絵を拡大縮小すると、ペンティアムを使ってもパソコンが止まってしまったのではないかと思うことが頻繁に起きる。

このように、マイクロソフト社のウィンドウズは、マッキントッシュやUNIXで成功した技術を自社のウィンドウズとWindows for Workgroupや、IBMとマイクロソフトが共同して開発し、その後IBMが独自に発展させたシングルユーザー向け真性マルチタスク用オペ

レーティングシステム、OS／2に導入すると同時に新機能を追加しつつ、少しずつ発展してきた。パソコン用ウィンドウ（GUI）の傾向を見ると、ウィンドウズ95でマッキントッシュOSにほぼ追いつき、その次の版では機能的にも性能的にも、ウィンドウズとマッキントッシュOSとOS／2とは肩を並べ合う。OSの選択は、アプリケーション間連携機能のでき具合とどのようなマルチメディア機能がバンドルされるかを見定めて後、操作方法の好き嫌いで決めると良い。

ウィンドウズNTとは

パソコン用ウィンドウズと違う道を構築しているOSがある。ウィンドウズNTである。ウィンドウズNTは、IBMとマイクロソフトが共同して開発したOS／2が切っ掛けになっており、両社の間での主導権争いの結果、マイクロソフトが名前を変えて独自に発展させたOSである。パソコン用にはウィンドウズ95を、ワークステーション／サーバー用にはウィンドウズNTをと、それぞれの棲み分けを模索している。

ワークステーションは、この数年間は成長が止まっており、現時点において年間で約百万台の市場があり、そのうち、四割の市場をサンが確保している。残りの市場をHPとIBMとシリコン・グラフィックスとDECが分け合っている。また、一九九四年で、約五十万台のウィンドウズNTを搭載したサーバーが出荷されている。将来的にはワークステーションとサーバ

ーの市場規模はパソコン市場規模の約一割と予想されているので、年間約四百万台の市場が期待される。
ワークステーションとサーバーは、どちらも全体のシステムは「ユーザーであるクライアント（客）とサーバー」という関係を持つ、ネットワークを使ったクライアントサーバー方式を採用している。ワークステーションやサーバーには数台から数十台のクライアント機が結ばれており、それらのサーバー機に要求される機能と性能は、マルチユーザーに対処できる分散処理機能と高性能である。
一九九六年に出荷予定の、ウィンドウズNTの次期バージョンであるCairoには、分散処理機能が追加される。また、一九九五年秋に米国で出荷されるウィンドウズNTには、マルチプロセッサ機能が既に追加されている。マルチプロセッサ用OSを使うと、マイクロプロセッサと主記憶メモリを搭載したプロセッサボードを追加するごとに性能が向上していく。
ただし、二枚のプロセッサボードを使ったから性能が二倍になるのではなく、OSに余分の負担がかかったりするので、性能は一・七倍ぐらいにしかならない。それでも、一つのアプリケーションが二つのプロセッサボードの性能を使うのだから、性能は目を見張るほどに向上する。だが、ウィンドウズNTを快適に操作させるためには、シングルユーザー向けパソコンと比較して、より高信頼性が提供でき、かつ高性能なマイクロプロセッサと、高速で大容量のハ

ードディスクに3Dグラフィックスボード、それに大容量の、少なくても一六Mバイト以上の主メモリが必要とされる。

もっとも、ウィンドウズNTを使ったクライアントサーバー方式はオープンアーキテクチャを採用しているので、クライアント機としてはＵＮＩＸマシンばかりでなく、ＩＢＭ系パソコンやマッキントッシュパソコンにも自由に接続できる。

ウィンドウズＮＴがＵＮＩＸを低価格システム市場から駆逐

ウィンドウズＮＴはハードディスクから直接起動される三二ビットＯＳである。ウィンドウズＮＴ用に開発されたソフトは、Ｗｉｎ３２サブシステムで直接動作する。Ｗｉｎ３２は画面へのウィンドウの表示やキーボード／マウス入力などの全ての基本的な機能を制御している。ウィンドウズＮＴがサポートするＯＳは、現在のところ、ＭＳ―ＤＯＳとＯＳ／2とＰＯＳＩＸ（ＵＮＩＸ）であり、それぞれのサブシステムが用意されている。ＭＳ―ＤＯＳサブシステム上には、さらにＷＯＷ（Ｗｉｎ16 Ｏｎ Ｗｉｎ32）サブシステムが用意されており、ＷＯＷを介して一六ビット版ウィンドウズとの互換性を提供している。

これらのサブシステムとは、アプリケーションに対してあたかも該当するＯＳが動作しているように見せかけるエミュレーション環境である。アプリケーションに対しては該当するＯＳが動作しているように見せかけ、実際には画面への表示の要求であればＷｉｎ３２に処理を依

頼し具体的な処理を行う。全ての処理をWin32を介して行うことにより、オーバーヘッドによる性能低下を招くが、保守性と信頼性が向上し、新たなOSのエミュレーション機能の追加が容易にできるメリットがある。

ウィンドウズNT3・5からは複数のWOWを起動することができる。一つのWOWでウィンドウズ3・1のアプリケーションがハングアップしても、その他のWOWにおけるウィンドウズ3・1のアプリケーションは影響を受けない。

マイクロソフトのウィンドウズNTに対する基本戦略は、ウィンドウズNTをインテル社のX86プロセッサ以外のマイクロプロセッサに移植(ポーティング)することである。MIPSのプロセッサ、DECのAlphaプロセッサ、IBMのPowerPCプロセッサ、などである。このため、各社とも、X86が採用しているデータの並べ方であるリトルエンディアン方式とその逆向きの並べ方であるビッグエンディアン方式の両方をサポートするようなバイエンディアン方式を採用している。

サンの一九九五年に出荷予定のUltraSPARCプロセッサや、HPのPA―RISCプロセッサの一部も、バイエンディアン方式を採用するようになり、ウィンドウズNTへの参加を予定している。ただし、ウィンドウズNTというオペレーティングシステムが移植されたとしても、アプリケーションソフトが移植されたり、新たに開発されなければただの鉄の箱に

なってしまう。しかし、UNIXと異なり、マイクロソフトがコントロールしているから、UNIXのように何種類もの方言があるようにはならないので、徐々にアプリケーションソフトが開発される。

現在の技術系でないUNIXユーザーが欲していることは、真性マルチタスク、高性能なグラフィックス、プラットフォーム同士の互換性、共通の操作性と同一アプリケーションソフトとデータファイルの使用による生産性向上とコスト削減、などである。これらの要求を満たすためには、クライアント機としてはパソコンが主流となり、自動的にパソコン用ウィンドウズと互換性があるウィンドウズNTがサーバー機のオペレーティングシステムとして最適となる。

ウィンドウズNTがペンティアムを採用したサーバーやワークステーションに搭載されると、パソコン用ウィンドウズと互換性があるウィンドウズNTがUNIXワークステーションとUNIXサーバーを低価格システム市場から駆逐してしまう。IBMのOS/2に分散処理機能が追加されるとウィンドウズNTに対抗することができる。

未来への夢を託した次世代システムのプラットフォーム

IBM系パソコンのシステムバスには、マイクロプロセッサと二次キャッシュや主記憶メモリを結ぶプロセッサバス、高速周辺機器を結ぶ拡張ローカルバス、キーボード/マウス/フロッピーディスク/パラレルポート/シリアルポート/時計などの低速周辺機器を結ぶ拡張外部バス（ISA）、などがある。

ローカルバスには、486プロセッサに直結し最大三枚の拡張ボードを搭載できるVLバスと、六四ビットへの拡張を考慮に入れた新世代のPCIバスがある。PCIバスは、マイクロプロセッサと非同期に動作しており、第二世代のPowerMACやワークステーションにも標準拡張ローカルバスとして採用される。このPCIバスには、最大十枚の、グラフィックス、ハードディスク用IDE、SCSI、LAN、オーディオ、モーションビデオ、などの高速性が要求される拡張ボードが搭載できる。

一九九四年末に、IBMとモトローラとアップルの三社が、新世代パソコンのプラットフォームの開発に合意した。一九九三年にIBMとモトローラが合意したPReP(PowerPC Reference Platform)プラットフォームにマッキントッシュのシステムを融合させる案である。ローカルバスにはPCIバスを採用し、搭載するオペレーティングシステムには、MacOS、ウィンドウズNT、OS／2、AIXなどがある。

マイクロソフトのワードとエクセルやSQLサーバー、ワードパーフェクトなどは既にPowerPCのウィンドウズNTで動作している。IBM系パソコンの強敵となる超高性能マイクロプロセッサを搭載したパソコンプラットフォームがいよいよ登場する。

マルチメディアに照準を合わせて、TIやモトローラやAT&T製の高性能デジタル信号処理プロセッサDSPを使ったマルチメディアボードが開発されている。一九九五年以後に発売

される新世代マルチメディアボードには、①オーディオ：音楽合成、音響効果、伸長・圧縮、②スピーチ：音声認識、文章読み上げ、伸長・圧縮、③イメージとビデオ：アニメーション、グラフィックス、静止画と動画の伸長・圧縮、④通信：FAX、モデム、LAN、ISDN、などの機能が搭載される。

第4節　マルチメディア時代の次世代マイクロプロセッサ

スーパースカラとスーパーパイプラインによる性能向上への効果と限界

命令の並列処理技術であるスーパースカラ技術と、高動作周波数への技術であるスーパーパイプライン技術は、二〇〇〇年頃に限界に近づく。

パイプライン技術を使ったマイクロプロセッサの動作周波数当たりの整数命令の性能には、大きな差がない。より高い性能を達成させるために、MIPSのR4000PCでは八段のスーパーパイプラインを使って動作周波数を上げ、R4000SCでは二次キャッシュコントローラを内蔵し、非常に大きな二次キャッシュを外部に設けた。また、HPのPA―RISCでは一次キャッシュコントローラのみを内蔵し、大きな一次キャッシュを外部に設けたりしてしている。

スーパースカラ技術を利用したときの性能は、スーパーパイプライン技術と比較して、確実に二倍以上になる。ペンティアムのスーパースカラ技術はワークステーション用ＲＩＳＣプロセッサと比較して一世代分遅れているので、ペンティアムの次機種と噂されているＰ６プロセッサの動作周波数当たりの性能はペンティアムの性能の約一・七倍位になる。さらに高い性能を得るためには、次項に述べる諸々の方法があるが、プログラムの実行中に分岐は頻繁に起きるので、性能は４８６ＤＸの性能の約六倍の三ＳＰＥＣｉｎｔ／ＭＨｚあたりが限界となる。

その限界は、一九九八～九年頃に登場する二世代後のマイクロプロセッサで、表面化する。ただし、半導体プロセスの向上により動作周波数は確実に五〇〇ＭＨｚに達するので、二〇〇〇年までに

スーパーパイプライン技術（～１９９２年）

マイクロプロセッサ	SPECint/MHz	SPECint	SPECfp	最高動作周波数	コメント
R3000	0.698	27.9	35.8	40MHz	
SPARC	0.543	21.7	27.4	40MHz	
486DX	0.552	27.6	15.2	50MHz	
68040	0.516	12.9	11.0	25MHz	
R4000PC	0.397	39.7	46.8	100MHz	2次キャッシュなし
R4000SC	0.545	54.5	68.5	100MHz	2次キャッシュ（4Mバイト）
PA-RISC	0.780	51.5	101.6	66MHz	1次キャッシュ（384Kバイト）

スーパースカラ技術（１９９２～９年）

マイクロプロセッサ	SPECint/MHz	SPECint	SPECfp	最高動作周波数	コメント
Pentium	1.00	100	81	100MHz	
SuperSPARC	1.28	77	98	60MHz	
PA7150	1.06	133	200	125MHz	
PPC601	1.06	85	105	80MHz	
PPC604	1.60	160	165	100MHz	
PPC620	1.69	225	300	133MHz	
21164	1.10	292	443	266MHz	
UltraSPARC	1.50	250	305	167MHz	
R10000	2.26	300	600	133MHz	

VLIWアーキテクチャ技術（１９９８年～）

図４－６　スーパーパイプライン技術とスーパースカラ技術による性能向上

現在の十倍の一二五〇SPECintの性能が達成される。より高い性能を得るためには、マルチプロセッサ方式を利用するのが最も現実性がある。それ以上の性能を得るためには、HPなどで提唱したVLIWアーキテクチャを採用する方法がある。

スーパーワークステーション用プロセッサの登場

DECがAlphaシリーズで火をつけた性能競争により、一九九五年に出荷予定の最高速RISCプロセッサの整数命令の性能は三〇〇SPECintとなり、DECの傑作ミニコンVAX11/780の三百倍の性能を持ったスーパーワークステーションが登場する。マイクロプロセッサの開発において、米国は、日本がDRAMやワープロやパソコン用周辺機器の開発と製造に力を注いでいる間に、二世代分、約六年という物凄い差を付けてしまった。

超高性能RISCプロセッサの開発の特徴は、次のようなものである。

①性能はペンティアムと比較して整数命令で二倍以上、浮動小数点命令で四倍以上。
②六四ビットマイクロプロセッサ。
③〇・五μmプロセスで四百万個以上のトランジスタの使用、チップサイズはパッケージの限界である約三百平方ミリ、最大の消費電力は五十ワット。
④スーパースカラ技術を使って、四個以上の命令を同時に発行、二個以上の整数命令と最大三つの浮動小数点命令を同時に実行。

⑤内蔵キャッシュの容量はチップサイズにより決められ、一次キャッシュは倍増されずに三二Kバイトで止まるか、倍増して六四Kバイトにするか、または二次キャッシュも内蔵化、HPは相変わらず一次キャッシュは内蔵しない。

⑥性能をより向上させる技術である、プログラムで指定した命令の順序を無視して命令を実行する先行命令制御（アウトオブオーダー）や、予測した分岐に従いプログラムを実行するスペキュラティブオペレーションや、レジスタリネーム、実行予定の命令を格納するリザベーションステーションの設置などの技術の大幅な採用。

⑦より高い性能を得るための、二次キャッシュコントローラの内蔵化。

⑧分岐予測機能の強化のためのＢＨＴ（分岐履歴表）とＢＴＡＣ（分岐先アドレスキャッシュ）の増大。

⑨命令の解読を簡単に行えるように、一次キャッシュに命令を読み込む時に部分的に命令を解読し、その情報を一次キャッシュに格納する方式の採用。

⑩マルチメディア用命令の強化と追加、特にＭＰＥＧ2用の復号化（伸長）機能の強化。

⑪超高性能浮動小数点演算、３Ｄグラフィックスをソフトで処理しパソコンとの差別化。

⑫メモリとの超高性能データ転送。

などである。

このように、もはやRISCプロセッサとは言えないほど複雑になった。ロード/ストアアーキテクチャと言い直した方が適切である。ワークステーション用プロセッサが異常なまでに浮動小数点命令の性能向上に力を入れているのは、高性能な3Dグラフィックスを、専用のチップを使わずに高性能な浮動小数点命令を使って、低価格で提供するためである。それが、ウインドウズNTを搭載したペンティアム機にワークステーション専門会社が対抗する一つの手段である。

各社の超高性能マイクロプロセッサの特徴

超高性能マイクロプロセッサの第一陣は、性能競争に火をつけた21064の後継機種であるDECのAlpha21164である。21164の最大の特徴は二六六MHzという超高動作周波数と九百三十万個のトランジスタを利用した九六Kバイトの二次キャッシュの内蔵化である。21064の内蔵クロックドライバーのトランジスタの大きさは、通常の十倍もあり、直線に直すと二十五cmもあった。しかし、消費電力は五十ワットもある。最大四つの命令が発行でき、性能は二六六MHzで二九二SPECintと四四三SPECfpである。

第二陣はIBMのPowerPCシリーズで、初めての六四ビットプロセッサであるPPC620である。動作周波数はAlphaの半分の一三三MHzで、最大四つの命令が発行でき、二二五SPECintと三〇〇SPECfpの性能がでる。性能度は一・六九SPECint

／MHzと製造開始日が近い割りには優れている。〇・五μmプロセスとはいっても現在量産可能な半世代前の〇・五μmプロセスを使っているので、一年以内に二〇〇MHzに近い動作周波数を使い、三〇〇SPECintと四五〇SPECfp以上に性能が向上する。

一次キャッシュは命令とデータにそれぞれ三二Kバイトずつ割り当て、二次キャッシュコントローラも内蔵している。620にビジネス向け命令を追加し、オ

図4－7　PowerPC620のブロック図

フィスコンピュータＡＳ４００用マイクロプロセッサやＸ８６命令を追加したＰＰＣ６１５などを開発している噂もある。

今まで、どちらかと言うと量産指向であったサンが、超高性能なＵｌｔｒａＳＰＡＲＣを発表し、スーパーワークステーション市場への参加を計画している。ＳｕｐｅｒＳＰＡＲ

	性能		動作周波数	性能度	命令発行	パイプライン	1次キャッシュ	トランジスタ数	面積	プロセス
	SPEC int92	SPEC fp92	MHz	SPEC int92 /MHz	Issue (整数/浮動・グラフィックス/ロード・ストア/分岐)	段数	命令 データ バイト	M	mm²	μm メタル層
HP										
PA7200	180	250	140	1.29	2(2 1)	5	2K(補助)	1.26	210	0.55 3M
PA7150	135	200	125	1.08	2	5	none	0.85	196	0.80 3M
PA7100	80	150	99	0.81	1(1 1)	5	none	0.85	196	0.75 3M
PA7100LC	108	167	100	1.08	2(2 1)	5	8K/8K	0.8	196	0.80 3M
IBM										
POWER2	126	260	71.5	1.76	6(2 2 4 2)	5	32K/32K			0.60 5M
PPC620	225	300	133	1.69	4(3 1 1 1)	5	32K/32K	7.0	311	0.50 4M
PPC604	160	165	100	1.60	4(3 1 1 1)	5	16K/16K	3.6	196	0.65 4M
PPC601	85	105	80	1.06	3(1 1 1)	5	32K	2.8	121	0.72 5M
PPC603	75	85	80	0.94	3(1 1 1 1)	5	8K/8K	1.6	85	0.65 4M
DEC										
21164	292	443	266	1.10	4(2 2)	7	8K/8K &96K 2nd Cache内蔵	9.3	298	0.50 4M
21064A	170	290	275	0.62	2(1 1 1)	7	16K/16K	2.8	164	0.50 4M
21064	138	200	200	0.69	2(1 1 1)	7	8K/8K	1.68	234	0.75 3M
21066	70	105	166	0.42	2(1 1 1)	7	8K/8K	1.75	209	0.68 3M
MIPS										
R10000	300	600	133	2.26	4(2 2 1)	6	32K/32K	5.9	298	0.50 4M
R4400SC	96	105	150	0.64	1(1 1)	8	16K/16K	2.3	184	0.60 3M
R4600	74	63	100	0.74	1(1 1)	5	16K/16K	1.85	77	0.64 3M
R4200	55	30	80	0.69	1(1 1)	5	16K/8K	1.3	78	0.60 3M
R3000	28	36	40	0.70	1					
サン										
UltraSPARC	275	305	167	1.65	4(2 5 1 1)	9	16K/16K	4.2	315	0.50 4M
HyperSPARC	103	127	100	1.03	2	6	8K/None	1.7	327	0.65 2M
SuperSPARC	77	98	60	1.28	3(1 1 1 1)	4	20K/16K	3.1	256	0.72 3M
MicroSPARC	75	61	100	0.75	1(1 1)	5	16K/8K	2.3	233	0.50 3M
SPARC	22	27	40	0.55						
インテル										
P54C Pentium	100	81	100	1.00	2(2 1)	5	8K/8K	3.3	164	0.60 4M
Pentium	67	62	66	1.02	2(2 1)	5	8K/8K	3.2	294	0.80 3M
486DX4	51.4	26.6	100	0.51	1(1 1)	5	16K	1.6	77	0.60 4M
486DX2	32.4	16.1	66	0.49	1(1 1)	5	8K	1.2	82	0.80 3M
486DX	19.5	8.9	33	0.59	1(1 1)	5	8K	1.2	82	0.80 3M
AMD K5	130	–	100	1.30	4(2 1 2 1)	6	16K/8K	4.2	–	0.50 3M
サイリックス M1	–	–	–	–	2	7	–	–	394	0.80 3M
ネクスジェン NX586	–	–	–	–	4(2 1 2 1)	7	16K/16K	–	196	0.50

図４－８　マイクロプロセッサの性能と使用トランジスタ数と面積

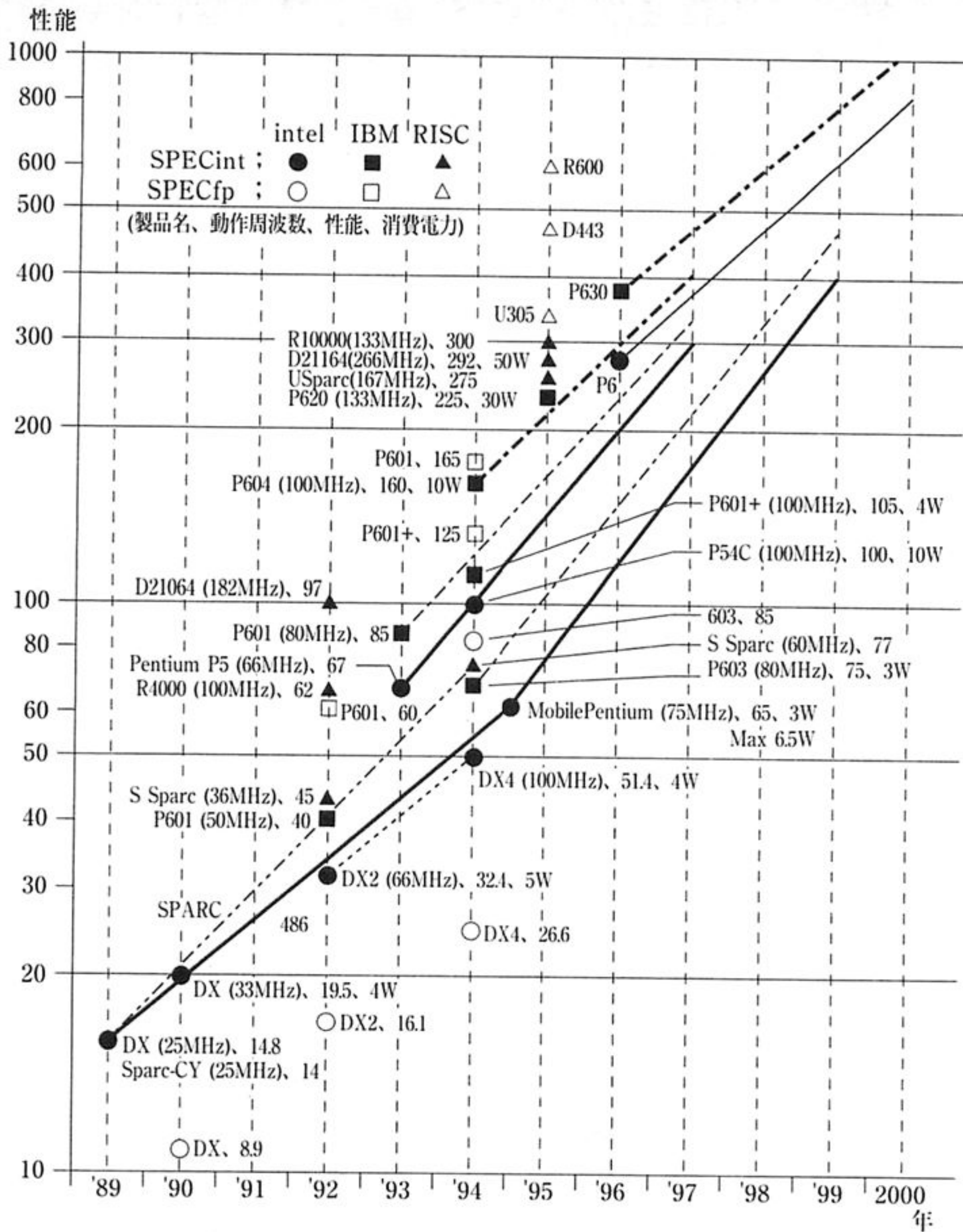



図4－9　マイクロプロセッサの性能の動向

486プロセッサの性能は動作周波数を上げても大きな進展はない。デスクトップ用にペンティアムのP54Cが、ノートブック用にはモービル・ペンティアムが使われる。SPARCも製品寿命に達し、UltraSPARCに移行しようとしている。PowerPCはアプリケーションにより多種類の製品を提供している。X86の成否はP６のでき具合と製品化時期にかかっている。

Cは動作周波数に問題があったため、UltraSPARCでは九段のスーパーパイプラインを使い、一六七MHzの動作周波数を達成し、二五〇SPECintと三〇〇SPECfpの性能を予定している。一次キャッシュを三二Kバイトに抑え、二次キャッシュコントローラを内蔵することにより、余ったシリコン面積を使って、最大四つの命令を発行し、二つの整数命令と三つの浮動小数点命令と二つのグラフィックス命令が同時に実行できる。

さらにマルチメディア用グラフィックス命令を追加した。八ビットデータの八ピクセル(画素)の計算を同時に実行し、二組の動画データをMPEG2規格で圧縮(符号化)・伸長(復号化)を並列に実行する命令を用意し、ビデオ・オン・デマンド機器のビデオサーバーに応用する計画である。

続いてMIPSがR10000を発表した。ただし、一九九四年十月の時点では、製品は開発中で試作品はでき上がっていない。MIPSが得意なスーパーパイプラインの段数を減少させ、スーパースカラ技術に傾倒しようとしている。計画では、一三三MHzの動作周波数で、三〇〇SPECintと六〇〇SPECfpの性能が出る。性能度は二・二六SPECint/MHzと最高の性能を得ようと計画中である。

パソコン市場でのインテル系プロセッサの優位性は変わらない

パソコン市場では、高性能なＲＩＳＣプロセッサが採用され、ウィンドウズＮＴも移植され、アプリケーションソフトが全てC言語で開発されたとしても、Ｘ８６命令アーキテクチャの優位性は変わらない。アプリケーションソフトの移植には膨大な人数と期間と費用がかかるので、移植の可能性が高いのは、台数が期待されるＩＢＭとモトローラとアップルが共同で開発中の新世代パソコンプラットフォームＰＲｅＰだけだろう。

ＩＢＭ系パソコン市場向けのマイクロプロセッサで成功するには、①Ｘ８６命令互換の高性能なマイクロプロセッサ、②Ｘ８６命令を高速にエミュレーションできる高性能なマイクロプロセッサ、の二通りの方法しかない。ただし、インテルのＸ８６マイクロプロセッサの優位性は徐々に下がっていく。競争相手が台頭してきたからである。

現在インテルが開発しているペンティアムの次機種であるＰ６マイクロプロセッサまでは、遅かれ早かれ、競争相手に追いつかれる。一九九八年までに、インテルが競争相手を振り切れる方法を見出せないと、市場占有率は五〇％以下に落ちる。

ペンティアム互換プロセッサと４８６互換プロセッサが台頭している。４８６互換プロセッサは、ＡＭＤとサイリックスとＴＩ、それに台湾のＵＭＣから販売されており、ＡＭＤは既に一九九四年秋に４８６市場の一三％以上を奪った。新設の工場とＤＥＣの製造ラインの利用に

より、供給量は飛躍的に増大する。今までのインテルが採った「限りある生産から最高の利益を得る」という方針を守るかぎり、一九九六年までに486市場の大半は486互換プロセッサで置き換えられる。

現在一〇〇MHzの486DX4の価格が六六MHzのペンティアムより高めに設定されていることは、486を捨てペンティアムに移行することを示している。

また、七五MHz（バスの動作周波数は五〇MHz）の三・三ボルトの低電圧版ペンティアムP54CをTCP（テープ・キャリア・パッケージ）に封入し、モービル・ペンティアムと名付け、ノート型パソコン市場に販路を広げている。この製品の性能は、システムの性能評価テストPCBenchを使って比較すると、六六MHz版ペンティアムとほぼ同じで、一〇〇MHzの486DX4より約三三％速いだけである。三三％ぐらいの性能向上では、実際にパソコンで使うと、その違いはほとんどわからない。

P54Cのチップサイズは百六十三平方ミリ、486DX4のチップサイズはわずか七十七平方ミリである。パソコンユーザーとしては486DX4の方が買い得である。486DX4は、一九九七年までは普及版パソコンに使われ、その後はエントリーレベルのパソコンに使われる。486互換プロセッサの登場により、パソコン市場の上位を占めている会社、コンパック、AST、DECが、AMDやサイリックスの486互換プロセッサを採用したり、採用の

予定である。とうとう、インテルが独占していたパソコン用マイクロプロセッサに風穴があいた。互換製品があった方が健全な競争が起きユーザーにとって好ましい。

ペンティアム互換プロセッサは一九九五年に三社から供給される。競争相手の登場により、性能向上と価格低減への競争が激しくなる。ネクスジェンのNx586は既に出荷されている。一九九五年に出荷を予定しているのはAMDのK5とサイリックスのM1である。一方、インテルも、一九九五年には一五〇MHz版を出荷し、ペンティアム市場を高性能プロセッサ市場へと誘導しようとしている。

互換プロセッサはそれぞれ内部の作り方が違うので、互換プロセッサ間での性能比較が問題となる。二次キャッシュコントローラが内蔵されると、システムレベルでの性能評価がより重要となる。ペンティアム互換プロセッサでは、より高性能を実現するために、RISCプロセッサで採用されたスーパースカラ技術である、スペキュラティブエクゼキューション（四分岐まで）と先行命令制御（アウトオブオーダー）とレジスタリネーム（三二レジスタ）と大きな分岐履歴表が使われている。

互換プロセッサの構造

サイリックスのペンティアム互換プロセッサM1は、ペンティアムを改良したような作り方で、最大二命令が同時に実行できるスーパースカラ技術と七段のパイプラインを使う。実行ユニットとして二つの整数ユニ

ットと浮動小数点ユニットがある。プロセッサそのもの性能はペンティアムより二〇%ぐらい速いと予想されている。一次キャッシュは、一六Kバイトの容量で、命令用とデータ用が一緒になっている。ただし、性能低下を抑えるために、二五六バイトの命令バッファを持っている。同一動作周波数ではペンティアムの性能と同等になるだろう。製品は一九九五年の第二四半期に発表される予定である。

X86の命令は、メモリにアクセス(ロードとストア)する機能と演算(例えば加算)機能を一緒にした、複雑な(Complexed)命令アーキテクチャではなく、複合化(Compound)命令アーキテクチャである。ペンティアムでは一命令を実行するのに一・四〜一・七クロックを使っている。AMDとネクスジェンはこれに目を付けた。

まず、スーパースカラの高性能RISCプロセッサのハードウェアを作り、次に、X86命令を解読した後、それをいくつかのRISC命令に置き換え実行する、といった方法を採用した。ネクスジェンのNx586は、スーパースカラ技術と七段のパイプラインを使い、X86命令を解読した後、RISC命令であるいつかのRISC86命令に置き換えている。実行ユニットとして二つの整数ユニットと一つのアドレスユニット(ロードとストア)と浮動小数点ユニット(現在は外部にある)があり、最大四つのRISC86命令が同時に実行できる。一次キャッシュは命令用に一六Kバイトとデータ用に一六Kバイトとペンティアムの二倍の容量

がある。さらに、二次キャッシュコントローラを内蔵している。性能は同一動作周波数で約七%ほど速い。

ＡＭＤのＫ５がペンティアムの最も厄介な競争者となる。Ｋ５の内部のハードウェアアーキテクチャはペンティアム互換プロセッサの中で最も斬新で、モダンで洗練されている。Ｋ５は、ペンティアムＰ５４Ｃとピンレベルで互換で、スーパースカラ技術と六段のパイプラインを使い、Ｘ８６命令を解読した後、ＲＩＳＣ命令であるいくつかのＲＯＰ命令に置き換えている。実行ユニットとして、二つの整数ユニットと二つのロード／ストアユニット、浮動小数点ユニット、分岐ユニットがあり、最大四つのＲＯＰ命令が同時に実行できる。一次キャッシュは命令用に一六Ｋバイトとデータ用に八Ｋバイトで、ペンティアムより少し大きい。四百二十万個のトランジスタを使い、性能は同一動作周波数で約三〇%ほど速いと予測している。製品の出荷を一九九五年第一四半期に予定している。

インテルとＨＰとの提携は六四ビット機開発への布石か

インテルには危機感がある。避けて通れない問題は、Ｘ８６互換プロセッサ、Ｘ８６エミュレーション技術、ＲＩＳＣプロセッサの性能、六四ビットマイクロプロセッサである。ペンティアムの次機種であるＰ６に替わる次世代マイクロプロセッサＰ７を登場させる一九九八年までに、解答を見つけなくてはいけない。しかも、競争相手が追いつけない方法でである。その方法の一つがＶＬＩＷ（Very

Long Instruction Word）である。
ＶＬＩＷ技術は決して新しい技術ではない。一九七〇年代に、現在一般的に使われているマイクロ命令を垂直に並べ逐次的に実行する垂直型マイクロプログラムと異なり、高性能を得るためにマイクロ命令を並列に並べ、いくつかのマイクロ命令を同時に実行する水平型マイクロプログラムが使われたことがある。また、現在の高性能なデジタル信号処理プロセッサＤＳＰでは三つ位の異なる命令セットが並列に実行できるような命令アーキテクチャを採用している。
メモリが高価であった一九七〇年代においては、プログラムに使うメモリの量を少なくするために、命令長がバイト単位で増加するバイト可変長命令がいわゆるＣＩＳＣプロセッサに採用された。また、プログラムに使うメモリの量を少なくするためと、メモリにアクセスする回数を減らすために、ＣＩＳＣプロセッサは、いくつかの機能を一つの命令に盛り込んだ複合化命令アーキテクチャを採用した。一九七〇年代後半に入ると、システムに高性能が要求されると同時に、メモリが大容量化され、高速になり、三二ビットの固定長命令がいわゆるＲＩＳＣプロセッサに使われた。現在、パソコンやワークステーションに使っているマイクロプロセッサは、命令を逐次的にメモリから読み込み、命令を逐次的に実行する垂直型命令アーキテキチャを採用している。
ところが、システムの主記憶メモリに使うＤＲＡＭも一六Ｍビットから六四Ｍビットへと成

長し性能も高くなる。必然的に、いくつかの命令を並列に同時にメモリから読み込み、命令を並列に実行する水平型命令アーキテクチャが実現可能となる。その水平型命令アーキテクチャがＶＬＩＷである。

一九八〇年代に入ると、二つのＶＬＩＷプロセッサがゲートアレイを使って開発された。ところが、集積度があまりにも低いのでプロジェクトは成功しなかった。そのグループがＨＰに入りＶＬＩＷの開発を現在行っている。一九八〇年代後半に入ると、インテルがｉ８６０プロセッサに整数命令と浮動小数点命令が並列に実行される一種のＶＬＩＷアーキテクチャを採用し、特定の応用分野へのスーパーコンピュータとして使われている。

ところで、現在の高性能なＲＩＳＣプロセッサの内部のハードウェアアーキテクチャを見ると、メモリから読み込んだいくつかの命令からなる命令群を垂直型から水平型に変換して命令の解読器に取り込み、いくつかの命令間でのスケジュールを組み、いくつかの命令実行ユニットに対して、いくつかの命令を同時に発行し、いくつかの命令を同時に実行している。すなわち、ＶＬＩＷへの準備はすでにでき上がっている。

一九九七年にＨＰがＶＬＩＷプロセッサを市場に投入する計画が発表されたが、時期的にも技術的にも十分可能性がある。ＶＬＩＷアーキテクチャでは、一般的には八つの異なる命令を一つの固定されたＶＬＩＷ命令として定義される。典型的なＶＬＩＷ命令は、三つの整数命令、

二つの浮動小数点命令、二つのロードストア命令、一つの分岐命令により構成されている。命令長は八つの異なる命令を作るために二五六ビットとなる。使用しない命令の箇所は「何もしない命令NOP」を挿入する。

今までマイクロプロセッサは、読み込まれた命令群をどのように組み合わせるかとか、命令の順序をどのように入れ換えるか、といった命令実行のスケジューリングを多くの複雑な論理回路で行っていた。だが、VLIW命令アーキテクチャではそれらの複雑な処理は全てコンパイラが担当し、VLIWは読み込まれた命令群を実行するだけとなる。命令の発行、実行順序や命令の終了時の制御が全てなくなるので、制御回路が飛躍的に簡素化され超高動作周波数が期待される。もっとも、非常に高いコンパイラ技術がないとただの鉄の箱になってしまう。

インテルとHPの提携は、HPが持つVLIW技術を使って、新たな六四ビット用命令を含めたX86命令とPA－RISC命令の両方をうまく移植できる、二〇〇〇年に向け、VLIW命令アーキテクチャを持ったマイクロプロセッサを共同開発するのが目的だろう。VLIW命令アーキテクチャに関してはDECもIBMも研究開発しているので、X86命令をいかにうまくエミュレーションして取り込めるかが成功への鍵となる。

第5章

マイクロプロセッサの発展がもたらすもの

マルチメディア機器の未来

第1節

マルチメディアとマルチメディア機器とは

「マルチメディア」という言葉には多くの定義がある。本書では、マルチメディアとは、「いろいろの情報を、デジタルデータに変換したあと、コンピュータを使って加工し、テキスト（文字）、グラフィックス（絵）、オーディオ（音声や音楽）、ビジュアル（写真やビデオ）、などの複数の表現メディアを、通信や放送や蓄積（ディスクなど）メディアなどの伝達メディアによって、統合的に扱うこと」と定義する。

また、マルチメディア機器とは、「デジタル化したマルチメディア情報の伝達を、通信網を介してインタラクティブ（双方向的）に行い、人間の感性に働きかけ、情報の表現力を高めるオープンシステムズ・ネットワーク機器」、と定義する。したがって、狭義に解釈すると、通信網に結ばれていないゲーム機器や、単方向性のＣＡＴＶ機器や、通信網に結ばれているがマルチメディア機能のないパソコンや携帯情報端末機や電子手帳などは、マルチメディア機器とはいえない。また、ＴＶチューナー付きマルチメディアパソコンといっても、テレビ番組が映るだけだったり、映るといっても、画面サイズを変更したり、画面を移動させたり、画面をキ

ャプチャーし情報をデジタルデータに加工できないパソコンもマルチメディア機器とはいえない。

マルチメディアを支える九つの技術

マルチメディアを支える技術には、①OS、②マルチメディア情報の編集（アプリケーション間連携機能）、③GUI；グラフィカル・ユーザー・インタフェース、④グラフィックス、⑤オーディオとビデオの圧縮・伸長、⑥文章読み上げ、⑦音声認識、⑧文字認識、⑨デジタル伝送システム、などがある。これらの技術をCD－ROMとウィンドウ環境をベースにしたパソコンに付加することにより、マルチメディア対応のプラットフォームであるマルチメディアパソコンとしての環境が整う。

マルチメディアにいち早く対応したパソコンはマッキントッシュだった。マルチメディアパソコンのプラットフォームには、68040プロセッサと音声用のサウンドチップとしても使えるデジタル信号処理プロセッサDSPとCD－ROMを搭載したハードウェアプラットフォームと、マルチメディア対応のソフトウェアプラットフォームとしてのシステム7がある。マルチメディア関連のシステムソフトウェアとして、動画対応の圧縮（符号化）したデータを伸長（復号化）するソフトウェアコーデックが利用できるQuickTimeと、内蔵のサウンドチップを通して一六ビットのステレオ音声が利用できるSoundManager、シリアルポート経由の外部MIDI（ミュージカル・インスツルメント・デジタル・インタフェース）対応楽器を

制御するMIDI Manager、が用意されている。

このソフトウェアコーデックにより、一六〇×一二〇画素の解像度の動画を一秒間に五・一五フレーム再生することができる。また、画像と音声の高能率符号化（データ圧縮）と複号化（データ伸長）技術であり、次世代の国際標準となるMPEGなどに準拠したハードウェアコーデックを追加することも可能となっている。

IBMパソコン系のマルチメディアパソコンのプラットフォームには、ハードウェアプラットフォームとしてマイクロソフトが提案し米国のソフトウェア出版社協会が規格として定めたMPC（マルチメディア・パーソナル・コンピュータ）と、ソフトウェアプラットフォームとしてマルチメディア拡張機能を追加したウィンドウズ3・1がある。次世代マルチメディアパソコンMPC2の規格は、IBMパソコンの互換機に486SX級のマイクロプロセッサを搭載し、さらにCD―ROMドライブと、クリエイティブ・ラブズ社のサウンドブラスター・ボードと同等のオーディオ機能と、ビデオキャプチャ・ボードを組み込んだものである。

また、各種のマルチメディアデータを共通したフォーマットで格納したり操作したりできるように、RIFF（リソース・インフォメーション・ファイル・フォーマット）仕様が定められた。ウィンドウズ3・1上に、Video for Windowsを組み込むと、マイクロソフト独自の圧縮・伸長アルゴリズムまたはインテルからライセンスを受けたIndeo（インテル・ビデ

オ・テクノロジー）を用いて、動画の圧縮・伸長をソフトウェアだけで実現できる。

この簡易ソフトウェアコーデックにより、マッキントッシュと同等の、一六〇×一二〇画素の解像度の動画を一秒間に十五フレーム再生することができる。ただし、マッキントッシュも同様であるが、ソフトウェアコーデックを使用したのでは、映像のサイズばかりでなく品質も非常に悪く、英会話の練習用の映像やプレゼンテーション用にビデオキャプチャー・ボードで取り込んだ映像の再生画像は、とても実用的とは思えない品質である。映像のサイズはせめて画面の半分は必要だし、品質もVHSビデオの映像レベルは必要である。

それでは、なぜマルチメディアには圧縮・伸長の技術が必要なのか。それは、データの格納容量と伝送速度である。蓄積メディアであるCD―ROMについて考えてみると、CD―ROMは本来音楽用に開発されている。音のデジタル化に、音が波としての振動に基づいていることを利用して、PCM方式で波の高さを毎秒四万四千百回サンプリングして一六ビットのレンジに記録すると、一秒間のステレオ音楽を録音するのに一七六Kバイト（一・四一一二Mビット）のメモリが必要とされる。

また、CD―ROMに録音されている音楽を再生するためには、一秒間に一・四一一二Mビットの伝送速度でデータを転送しなければならない。音楽用CD―ROMの容量は五G（五〇〇〇M）ビットなので、データを圧縮しなくても約一時間のステレオ音楽を録音することがで

きる。CD—ROMのデータ伝送速度は一・五Mビット/秒となっている。この音楽用CD—ROMに音だけでなく映像も格納するためには、音と映像のデータを大幅に圧縮しなければならない。

ところが、テレビ電話サイズでは一七六×一四四画素、テレビ会議サイズでは三五二×二八八画素、現行のテレビサイズでは七〇四×四八〇画素、の解像度の映像を一秒間に三十フレーム分映すためには膨大なデータ量が要求される。色数を二百五十六色使ったとしても、一フレームの映像を格納するのに約八一Mビットのメモリ容量が必要となり、一枚の音楽用CD—ROMにはたった一分間の動画しか格納できない。また、ビデオ入力信号をデジタル化した後での伝送速度は、VHSビデオの品質であっても三〇Mビット/秒と高速でCD—ROMの一・五Mビット/秒の伝送速度とは大きな差がある。このため、音ばかりでなく映像のデータも圧縮する必要がある。

デジタル映像技術の重要性

映像のデジタル伝送システムは、マルチメディア時代の次世代情報通信インフラストラクチャ基盤技術であり、高能率符号化(データ圧縮)技術とデジタル変調技術により成り立っている。国際標準方式にほぼ決まったMPEG2による高能率符号化(データ圧縮)とデジタル変調技術は、米国のNII(ナショナル・インフォメーション・インフラストラクチャ)に代表される情報スーパーハイウエ

ーを実現する必須の技術である。見たい時に見たいビデオが見えるビデオ・オン・デマンド（VOD）のようなサービスで大量の映像と音のデータを既存の伝送路で送るためや、テレビ会議システムや、地上波放送用や衛星放送の周波数を有効に使うためや、コンピュータの相互運用性を実現するためにも使われる。

このデジタル変調という聞き慣れない技術を使うと、日本や米国のテレビ方式であるNTSC方式の一チャネル分の伝送帯域幅（六MHz）で、一六値VSB残留側波帯変調を使用すると、四三Mビット／秒、六四値QAM直交振幅変調であれば二四～三〇Mビット／秒、の伝送速度を望める。したがって、テレビ放送の情報をデジタル化し、情報の圧縮により伝送速度を五Mビット／秒に落とすことができれば、デジタル変調技術を使うことにより現行の一チャネルで六～十チャネル分の映像を送ることができる。一六値VSBは米国の次世代テレビATV（Advanced TeleVision）のケーブルテレビ用方式として採用されたり、米国地域電話会社NYNEXでのビデオ・オン・デマンドの試験サービスに採用されたり、米フィリップスとゼニスと米CLI社が提携してMPEG2と共にセット・トップ・ボックスに採用しようとしている。

一方、欧州と日本は周波数利用効率がより高いOFDM多搬送波変調という搬送波にデータを割り当てる変調方式に力を入れている。今後、日本での技術の開発と標準化や応用への進展が遅れると、米国からの圧力が強まり、最悪のケースでは、日本国内の情報通信ネットワーク

の配線しか担当できなくなる恐れがある。

画像と音の圧縮・伸長の符号化方式には、カラープリンタや電子スチルカメラなど高精細が要求される静止画に最適なJPEG（ジェイペグ）、音楽用CD―ROMなどの蓄積メディアを使って映画など動きの激しい映像をVHSビデオの品質で再生するMPEG1（エムペグ）、高品位テレビや通信メディアで必要なリアルタイムに情報の圧縮・伸長をする国際標準になるMPEG2がある。

静止画の圧縮・伸長に使われるJPEGを用いると、二百五十六色の七〇四×四八〇画素の画像には約三四〇Kバイトのデータ量が必要とされるが、圧縮後のデータ量は約三五K～五〇Kバイトになる。圧縮率は約十分の一と決して高くはないが、画質が最重要視されている印刷に使われている。

パッケージ型マルチメディア機器は情報家電の本流へ

蓄積メディア対応のMPEG1を利用した「ビデオ規格」は、松下電器産業、日本ビクター、オランダのフィリップス、ソニーの四社でまとめられた。機能として、VHSビデオ品質で三五二×二四〇画素の画像を一・一五二Mビット／秒の伝送速度で毎秒三十フレーム再生し、音質をほとんど劣化させずにステレオ音楽を二二四K／秒の伝送速度で再生し、音楽用CD―ROMに最大七十四分の動画と音楽を格納することができる。画像とオーディオ信号を合わせて、音楽用CD―ROMの

一・五Mビット／秒の伝送速度内に納めることができる。画像の圧縮率は約二十分の一で、音の圧縮率は約六分の一である。ビデオ規格は七〇四×四八〇画素の高精細な静止画も再生できる。

このビデオ規格を使った最初の応用は、一九九二年秋に日本ビクターから発売されたビデオ・カラオケ・システムであった。ビデオCD対応のMPEG1は、情報の圧縮より伸長に主きが置かれており、ランダムアクセスや復号化処理のリアルタイム性の特徴を生かして、カラオケばかりでなくビデオCD対応ステレオなどの家庭用オーディオ・ビジュアル・システムにも使われる。また、次世代ゲームマシンでは、標準搭載またはオプションとして、ビデオCD規格準拠を唱っているので、CDビデオカラオケを利用することができる。さらに、マルチメディアパソコンに組み込みアプリケーション間連携機能と共に使われると、教育や各種のプレゼンテーション、マニュアルなどに広範囲に利用される。

少し画質が落ちるが、毎秒十五フレーム分の三五二×二四〇画素の画像を圧縮して格納すれば、四Mバイトのメモリ容量で約一分間の画像取り込みが可能となる。パソコンのハードディスクの大容量化が進んでいるので、十分に実用できる時代となった。また、四倍速のCD―ROMが製品化されているが、それは伝送速度を上げ、MPEG2に対応させたりして、より高精細な画像を提供するためである。

一九九四年には、テレビ付きパソコンが数多く開発された。なかには、テレビが付いているだけの機種もある。ところが、単なるサウンドボードに飽き足らず、専用スピーカーを搭載しデジタル信号処理プロセッサDSPを使って各種の音響効果を提供したり、画像をワンタッチで取り込めるボタンを付けたり、ビデオ動画を四Mバイト／一分の密度でキャプチャーしたりして、パソコン専門会社のパソコンより使いやすいマルチメディアパソコンに仕上がっている。ケーブルテレビ対応にすれば電波障害もなくFM放送も受信でき、オーディオビジュアル・テレビパソコンが誕生し、パソコンが次世代の情報家電の主流になる。

ネットワーク型MPUは情報通信ネットワークで開けた世界へ

情報の圧縮と伸長の両方にリアルタイム性を持たせた高画質で高圧縮率のMPEG2は、蓄積メディアだけでなく放送メディアや通信メディアなどの異なるメディア、異なるハードウェア・プラットフォームで情報交換ができるメディア統合の圧縮・伸長の符号化方式である。また、分解能が可変になっているため、HDTV品質の解像度を持つデータを復号器を通すと、現行テレビ品質の画像を再生可能なシステムを構築できる。

MPEG2は静止画用JPEGを包含し、MPEG1とは下方互換性を維持している。機能として、現行テレビの受信品質で七〇四×四八〇画素の画像を約四十分の一に圧縮して、四Mビット／秒の伝送速度で毎秒三十フレームの録画・再生ができ、HDTV（High Definition

TeleVision）受信品質で一九二〇×一一五二画素の画像を三〇Mビット／秒の伝送速度で毎秒六十フレーム録画・再生できる。

ＭＰＥＧ２による標準化への動きは、特に米国において、ケーブルテレビ分野ではビデオ・オン・デマンド、放送分野では次世代テレビＡＴＶや多チャンネルへの応用としての衛星放送、通信分野においては一般の電話回線を利用した映像伝送やＡＴＭ（非同期転送モード）ＬＡＮ業界によるＢ—ＩＳＤＮ（広帯域サービス総合デジタル網）対応の汎用の符号化、欧州においてはデジタル放送プロジェクトＤＶＢ、へと急速に広がっている。

また、パソコンでＭＰＥＧデータを扱うためのＡＰＩ（アプリケーション・プログラム・インタフェース）の仕様が、マイクロソフトも参画する米国ＯｐｅｎＰＣ—ＭＰＥＧ協会で一九九四年八月に決められた。

ＭＰＥＧ２用圧縮・伸長ボードが開発されると、ビデオキャプチャー・ボードやマイクロフォンから取り込んだ画像や音声を情報圧縮してハードディスクに格納したり、ハードディスクやＣＤ—ＲＯＭ、通信網を介して送られてくる情報圧縮された映像や音楽や音声を、ＶＨＳビデオの品質で再生するだけでなく、アプリケーション間連携機能を使って鮮明な画像や音楽や音声を、文書や図面やグラフと一緒にデジタル書類に貼りつけることも可能となる。

文字による文章と、図表と、グラフと、映像と、言葉によるデジタル書類で総合的な説明が

でき、情報の伝達が高効率で正確に迅速に行われる。味気ない文字だけによる無機質な電子メールとも、肉声のない紙による書類とも、おさらばである。

マルチメディアに要求されるマイクロプロセッサの性能と実現方法

マルチメディアコンピューティングに要求される性能を、MOPS（モプス）で表すことができる。MOPSは、一秒間に命令が何百万回実行できるかといったMIPSと違い、一秒間に実行できるオペレーションを百万回の単位で表したものである。演算のほかにメモリへのアクセスも一つのオペレーションとして計算される。したがって、メモリからの（への）ロード（読み込み）／ストア（格納）も独立した命令としているRISCプロセッサの命令実行回数に相当する。一方、複合命令であるCISCプロセッサでは、公表されたMIPS値の約三割増しの値をMOPSと考えればよい。

GUIによるヒューマンインタフェースに要求される性能は五MOPSであるので、386や68030プロセッサを使った三二ビットパソコン上でウィンドウを実行したときに感じるもどかしさは、マイクロプロセッサの性能が悪すぎるからである。また、一秒間にたった五フレームしか映せないソフトウェアによる簡易型動画に要求される性能は二五MOPSであるので、486や68040プロセッサを使った簡易型動画の鮮明でない画像品質とぎこちない動きも、マイクロプロセッサの性能が悪すぎたからである。

マルチメディアへの要求が高くなるにつれ、マイクロプロセッサの性能向上への期待は年々高まってきた。音声や静止画やテレビ会議への対応は、信号処理プロセッサ（DSP）の高性能化で対処できた。ビデオCD対応のMPEG1でも、三五二×二四〇画素を毎秒三十フレーム分処理すると、圧縮に八六三〇MOPS、伸長に八〇〇MOPS、の性能が必要である。

MPEG2になると、七〇四×四八〇画素を毎秒六十フレーム分処理すると、圧縮に三四五二〇MOPS、伸長に三二〇〇MOPS、の性能が必要であり、パソコンに使われているペンティアムの約三百倍の性能が要求される。

MPEG2のデータ圧縮に対応するためには、マイクロプロセッサの命令を使ってソフトウェアで対処するには、動作周波数が一GHz（一〇〇〇MHz）になり、命令が並列に五つ実行できても不可能だ。永遠に不可能だろう。そこで、MPEG2の画像圧縮には専用チップが必須となる。ところが、MPEG2の画像伸長（復号化）やテレビ会議の画像圧縮（符号化）は、グラフィックス機能に特別な命令を追加することにより実現できる。

ワークステーションを使った応用では、テレビ会議と画像と音声を使った情報収集は必須な機能である。ワークステーション用RISCプロセッサであるサン社の次世代プロセッサUltraSPARCでは、浮動小数点命令の実行ユニットにグラフィックス機能が追加されており、さらにグラフィックス用演算ユニットを分割し八ビットのデータ演算を八つ並列に実行で

きる。また、CISCプロセッサには必ずある、いくつかのレジスタをまとめてメモリへストアしたりロードしたりできる、マルチプルロード／ストア命令が追加されている。

マイクロプロセッサは誕生以来、少しずつ応用に適した複合命令を追加しつづけてきた。RISCプロセッサも同じ道を歩んでいる。RISCプロセッサとは縮小命令ではなくロード／ストアアーキテクチャであることが再認識されたと思われる。画面サイズを三五二×二四〇（テレビ会議では二八八）に抑えれば、特定機能をマイクロプロセッサに追加することにより性能を四十倍から五十倍に高めることで、MPEG専用チップを搭載した特別な高価なボードを使わずに、画像の圧縮と伸長が実現できる。性能は少し劣るが、HPもこのようなマルチメディア機能を7100LCで既に実現しており、インテルとの提携によるマイクロプロセッサにマルチメディア機能を搭載するかもしれない。

携帯情報端末機器の将来

携帯情報端末機器のビジネスがなかなか飛び立たない。携帯情報端末機器にはペン入力ができる電子手帳的なPDA（パーソナル・デジタル・アシスタンツ）と、通信を主目的としたパーソナルコミュニケータがある。どちらも明確な定義がない。まだ、誰も成功したことがなく業界標準もないマーケットである。

米国のEO社がAT&T社の三二ビットプロセッサHobbitシリーズATT92010

とGO社のペンポイント（PenPoint）OSを使ってパーソナルコミュニケータを一九九二年に出荷した。ペン入力もかなり快適にでき、通信機能も持たせ、バンドルされたソフトも決して悪くなく期待されたが、価格が電話機能が付かなくても千五百九十九ドル以上と高く、気がついたら市場から消えていた。

また、コンパックはインテルと提携したVLSI社が開発する386SXプロセッサを高集積化したPolarプロセッサとマイクロソフトのWinPad—OSを使ったPDAを計画したが、PDAマーケットの不振により、開発を延期した。この結果、インテルはVLSIとの提携を解消し、資本を引き上げた。

比較的成功したPDAに、一九九三年八月に七百九十九ドルの価格で市場に登場した、アップルのPDAタイプのニュートン（Newton）シリーズのメッセージパッド（MessagePad）と、六百九十九ドルの価格で市場に登場した、カシオと米国のタンディ社が共同で開発したズーマー（Zoomer）がある。

アップルのニュートンは、イギリスのARM社のキャッシュとメモリ管理機能を搭載した三二ビットマイクロプロセッサARM610と、AppleOSを使っている。一方、ズーマーは、8086互換プロセッサと、GeoWorks社のGeos—OSを使っている。

AT&Tは、AT&Tとモトローラとアップルが資本を投資したゼネラル・マジック社が開

発した通信用プログラム言語テレスクリプト（Telescipt）を使って、パーソナルコミュニケータ分野のネットワークサービス事業を開始した。パーソナリンクサービス（PersonaLink）の名称で月額九・五ドルで利用できる。ただし、ＦＡＸ送信には送信量により料金が加算される。

ソニーが一九九四年末に発売を開始したマジックリンク（MagicLink）パーソナルコミュニケータは、ファクスモデムとデータモデムを搭載し、モトローラの６８０００シリーズの６８０２０と同等の性能を持った高集積化プロセッサ６８３４９とゼネラル・マジックのマジックキャップＯＳとテレスクリプトのプログラム機能を使い、九百九十五ドルであった。通信機能が内蔵されておりＦＡＸとデータ通信もできる。ペンによる文字入力はなく、表示面に表れるキーボードを使って文字の入力ができる。将来的には、さらに性能を向上させるために６８０００を大改造して四倍に性能を向上させたＡＣＥ（コード名）をプロセッサとして使うだろう。ただ、値段がもう少し安くならないと大きな成功は得られない。

また、モトローラが開発したエンボイは、外勤が多いビジネスマンをターゲットにおき、ファクス送信モデム、データモデム、受送信用の無線モデムを内蔵したパーソナルコミュニケータで、ソニーのマジックリンクと同様にゼネラル・マジックのマジックキャップＯＳとテレスクリプトを搭載している。

携帯情報端末機器の業界標準は少しずつだが固まりつつある。オペレーティングシステムは、ゼネラル・マジックのＭａｇｉｃＣａｐとアップルのＡｐｐｌｅＯＳとなる。ただし、携帯情報端末機器は通信機能がより重要視されるので、ゼネラル・マジックの通信用プログラム言語テレスクリプトが標準化される。テレスクリプト機能はクライアントとしてもサーバーとしても使えるので、ネットワークには必須の言語となる。

前述したＡＴ＆Ｔのパーソナリンク・サービスを利用すると、テレスクリプトによるプログラムを付加して電子メールを送った場合、一定期間メールが読まれなければ別のアドレスへ転送したり、送られてきたメッセージにより自動的にアドレスブックに情報を書き込んだり、古くなった情報を更新することができる。また、航空券の予約を日時・目的地の条件に合うように行ったり、サーバーは予約した便をモニターしつつ変更があったときには自動的にメッセージをクライアントに送る、ような使い方もできる。一度、言語が標準化されることにより、それを標準としてアプリケーションソフトウェアが開発されることは、パソコンの歴史が語っている。

第2節

マイクロプロセッサの発展がもたらす社会の変化

マイクロプロセッサによる第三次産業革命

マイクロプロセッサが提供する知的能力が、家電製品、オフィス機器、自動車、通信など、あらゆる分野に広範囲に大量に活用されている。十八世紀中葉にイギリスで始まった、動力による第一次産業革命は、人類の機械力学的能力の限界を事実上なくした。次に、十九世紀中葉にアメリカで始まった電気による第二次産業革命は、通信や放送や電化製品によって速度と快適さのある近代文明を人類にもたらし、大規模なエレクトロニクス産業を築き上げた。

そして、シリコン小片に乗った知的能力を持った、マイクロプロセッサによる第三次産業革命は、新たなる文化を創造するための「知への道具」を人類にもたらした。マイクロプロセッサの誕生により、品質をいかに高くかつ安く物を作るかといった生産という、文明を重視した時代から、何を作るかといった創造という文化を重要視する時代に入った。

現在、マイクロプロセッサは、産業、教育、社会、医療など、将来の我々の生活の多くの面に大きな影響を及ぼし始めている。

第二次大戦後に日本が強力に押し進め、高度成長をもたらした高度技術大量生産という文明の創造と発展にかげりがでてきた。一方、米国はパソコンという文明の上に、マイクロプロセッサ、オペレーティングシステム、アプリケーションソフトウェア、マルチメディアなどの文化を創造し発展させてきた。日本が今のまま生産という文明を重視しすぎると、日本が莫大な資金を投入して苦労して築き上げた文明の上に、米国の文化を構築するような体制になってしまい、大きな付加価値を日本が享受できなくなる。

生産という文明から創造という文化の時代へ

また、パソコンの分野では、米国で開発されたオペレーティングシステムのみを使うようになると、翻訳された米国の文化が日本に浸透し、米国流の表現方法、思考方法、仕事の進め方、価値観、が主流になり、日本本来の文化が消滅する。

日本が独自に開発した高性能マイクロプロセッサは、現在、米国と比較して二世代分の差があり、六年以上遅れている。さらに、マイクロプロセッサの開発技術やコンピュータ支援設計ツールであるＣＡＤ技術では、もっと大きな差がついてしまっている。いま、パソコンに関連する製品で日本から発信できるのは、メモリや大量生産向けゲートアレイ回路やフロッピーディスクなどの生産に関連した部品という文明だけである。もっとも、高精細カラー液晶パネルを使ったノート型パソコンは、日本が誇るべき超高度文明である。ところが、歴史が証明して

いるように、文明は必ず滅び、新たな文明が台頭してくる。
一時期、日本製パソコンが大量に輸出されたが、米国における日本製高性能パソコンの輸入の実質的な禁止という不幸な状況が生じ、輸出が激減したことがある。現在は、パソコン製造のインフラの整備に成功した台湾が、パソコンを六〇%以上生産している。パソコンのマザーボードに限定すると、世界の八〇%が台湾で生産されている。
台湾におけるパソコンの製造は、現在の日本では考えられないやり方で行われている。パソコンの生産を一貫して行っている会社もあるが、ある会社ではパソコン用のマザーボードだけ年間五百万枚以上も製造したり、ある会社ではでき上がったマザーボードの洗浄だけを行い、また、ある会社ではパソコンの組み立てだけを行ったりと、資本関係が全くない独立した会社が独自に生産している。残業代も時間に対してではなく、出来高に対して行われたりしていて、就業時間内に目標とする生産台数が達成されなければ、残業代は支払われないケースもある。
一九七六年に超LSI技術研究組合を結成して始まった、日本における半導体研究を目的とした超LSI国家プロジェクトは、日本の半導体製造機器も含めた半導体産業を、米国の水準までに高め、ある分野では米国を追い抜いたりすることに大いに役立った。その技術をさらに改良することにより、米国で開発されたり、されているワークステーション向け超高性能RISCプロセッサの受託生産を可能にした。

ところが、最も量が期待できるパソコン向けマイクロプロセッサは、その使用される半導体技術は現時点において実現化されている技術であるので、全て米国と台湾の半導体会社が生産している。メモリの代表選手でもあるDRAMメモリも、韓国からの追い上げが年々激しくなってきている。さらに、DRAMに超高速バスインタフェースを集積したRDRAMメモリが米国で提案され、日本電気と東芝と富士通がライセンスを取得して生産を開始した。マイクロプロセッサがより高性能になると、性能の劣化を防ぐために、高性能バスインタフェースを採用せざるをえなくなる。DRAMという文明があっても、高性能バスインタフェースという文化により、付加価値を米国に持っていかれてしまう。

年々、携帯用パソコンでは、着脱可能なハードディスクと同時に、フラッシュメモリを使った機械部品のないシリコン・ハードディスクの需要が高まりつつある。現在、フラッシュメモリへの書き込み回数は最大十万回であるが、百万回の書き込みができなければ、実用には不向きである。ところが、マイクロソフトは、見かけ上百万回の書き込みが可能になるように、OSを使って対処しようとしている。これが完成すると、その仕様に合わせてフラッシュメモリを改造しなくてはならなくなる。

このようにメモリであっても、生産ということだけに専念していると、生産ラインだけを利用される国になってしまう。しかし、教育体制や社会体制や産業体制を改革し、新たな文化を

築き上げるチャンスでもあるかもしれない。

パソコンの本質は個人の創造性を生み出す書斎

マルチメディア以前のパソコンで代表されるデータプロセッシング機器の特徴はアプリケーションソフトウェアを買ってきて、データを作成することであった。その結果、紙と鉛筆を使った時代と比べて、人間の編集能力や処理能力や表現能力は大幅に強化され増幅された。

マルチメディア時代のパソコンには二つの特徴がある。一つの特徴は、パソコンが、テキスト（文字）、グラフィックス（絵）、オーディオ（音声、音楽）、ビジュアル（写真、ビデオ）などいろいろのメディアを用いて、人間の感性に訴えることにより人間の表現能力をより高める手段として使われることである。

もう一つの特徴は、CD—ROMや通信回線やケーブルテレビを介してデータベースを購入し、そのデータをパソコンを使って加工することで、仕事のレベルが専門家の領域にまで高められることである。

マルチメディア時代の文化は、マルチメディア対応のアプリケーションソフトウェアとコンテンツ（データベース）である。それらを実現させるために、IBM系パソコンのOSであるウィンドウズや、OS／2とマッキントッシュの次期OSであるガーシュウィン（Gershwin）に搭載されるアプリケーション間連携機能であるOLEとOpenDocが使われる。

これらの機能を、買ってみたいと思わせるアプリケーションソフトウェアやデータベースへの応用に成功したものが、マルチメディア時代の勝者となる。
歴史的に、ＤＴＰ用ソフトであれ、表計算ソフトであれ、パソコンは使いたいソフトを手に入れるために購入されている。ワープロ機能、ドローイング機能、表計算機能とアウトラインフォント印刷を使うだけでも、人間の表現能力は非常に高まる。マイクロプロセッサの開発でもそうだが、同じようなことを三度やると素晴らしいでき具合に、エレガントに仕上がる。特に、プレゼンテーション書類にはエレガント性が要求される。
プレゼンテーション書類の作成について述べてみよう。一度目は、元になる資料そのもののデータベース作成に時間がかかり、プレゼンテーション書類作成に時間を割くことができない。実際にプレゼンテーションをやってみると、自分の主張したいこと、人の知りたいこと、自分が正確に理解していなかったこと、説明不足、説明過多、相手が理解していないことや興味のないこと、などがわかってくる。
二度目になると、元資料やプレゼンテーション書類のデータベースは追加のみとなり、考えることにより多くの時間が使え、プレゼンテーション書類作成に専念することができる。この段階になると、説明という単なる情報伝達行為から抜け出し、解説付のプレゼンテーションを、自分の言葉で行うことができ、品質はより高くなる。

三度目になると、同じデータベースでも版を重ねる度に、自分自身の理解度が増し、各々の重要さが明確化され、自分なりの創造性を付加する余裕も出てきて、プレゼンテーション書類というデータベースを使って、自分が想像する将来像を語ることもできるようになる。特に、プレゼンテーション用の図やグラフは、自分が考えたストーリーを抽象化したり具象化したものだから、版を重ねるうちに、エレガントになっていく。それがまた自分の一番の財産にもなる。何年か前のプレゼンテーション用資料をみると、随分と幼稚な見方をしていたものだと、呆れることもある。

パソコンは、単に文章やデータベースを入力したり印刷したりするために使われるだけでなく、入力されたデータベースを利用して創造的な仕事をするために使われるようになってきた。私のパソコンにも多くのデータベースが入力されている。データベースはアイデア用とプレゼンテーション用と資料用に分けられている。マイクロプロセッサに関しての資料だけでも、ただし技術資料は除くが、A4サイズ（四十八文字×六十ライン）で、文字と図と合わせて、約二百ページ分ある。このデータベースを生きた状態に保つために、一カ月に一回はデータベースの追加や訂正をしている。

紙と鉛筆を使った時代でも、データベースそのものはあったが、その保守が大変だったからデータベースそのものの量を制限しなければならなかったし、目的とする書類の作成を最初か

ら始めなくてはならなかった。資料作りから始めるのか、考えることから始めるのか、その違いは物凄く大きい。パソコン自体が、単なる作業机から、データベースマシンとなり、書庫となり、通信基地になり、快適な作業場である書斎になっていく。

編集能力、処理能力、表現能力、会話能力をサイバースペースで実現

一九九〇年代後半における最も興味あるパソコンの機能の一つに、アプリケーション間連携機能がある。ＯＬＥでは、現時点においては、実行中のワープロのアプリケーション上で他のアプリケーションを呼び出したりして連携を行うので、まだ完成品とはいえない。書類を作るということは、文章も絵もグラフも動画も、それらは全て個々の部品として取り扱いたいからである。

一方、ＯｐｅｎＤｏｃでは、真っ白な、何も書いていない紙という画面上に、個々のアプリケーションを呼び出してデータの作成や編集という作業ができる。何も書いていない紙に、自分が考えたレイアウトで、自分の好きなアプリケーションソフトで作成した、文章や絵やグラフや動画を音や音楽と一緒に貼り付けることができたら、エレガントで素晴らしい書類ができ上がるだろう。

一九六八年にエンゲルバードにより開発され、アラン・ケイによって改良され、ギブソンにより命名された、ウィンドウを通して見える文章、数字、グラフ、イメージなどの「サイバースペース（情報空間）」を使って、人間の編集能力や処理能力を増幅させる、という夢が二十

五年の歳月を経て完成される。

さらに、現在では、入力した文章を音声で読み上げるソフトとハードが開発されているので、送られてきた文章を、予め登録しておいた声で読み上げることもできる。やがては、テレビ会議システムが組み込まれたパソコンで、翻訳ソフトを使って、外国人との会話を日本語で直接できる時代になる。

人は誰も子供時代に、絵日記を書いたり、学級新聞や学校新聞を作ったり、工作をしたり、詩を書いたり、作曲をしたりした記憶がある。学級新聞を作ったときには、真っ白な大きな紙に向かって、その日に一番印象が強かったことや感動したことや見聞したり調べたことなどを、自分たちが納得するレイアウトで、天真爛漫に、自由に、のびのびと、自分たちの創造性を大なり小なり発揮して、書いたりして創作活動に熱中したことだろう。そこには、いろいろの文章があり、グラフや、絵や、写真もあった。

現在は、パソコン上で、文章やグラフや絵ばかりでなく、美しいナレーションやメッセージを付けたビデオや静止画や、作曲した音楽を貼り付けて、マルチメディア学級新聞ができる時代になりつつある。さらに、その学級新聞を、ローカル・エリア・ネットワークを介して他の学級へ送ったり、受け取ったりして、マルチメディア・コミュニケーション学級新聞ができ上がる。学校新聞を作るときにも、データベースが全てデジタル化されているから、地域版であ

る学級新聞のデータベースを加工したりして使うことも簡単にできる。マルチメディア学校新聞を、情報通信ネットワークを介して、キーボードを介したコマンドベースではないグラフィカルなユーザーインタフェースを持つマルチメディア通信を使って、多くの学校に送ったり受け取ったりできる時代になりつつある。

ビジネスにおいても学校新聞と全く同じように、マルチメディア出張報告書やマルチメディア企画書ができ上がる。音声や画像を使って肉声のこもった、感性に訴える説明はよりわかりやすい報告書になる。

リモートサイトオペレーションによる地方の活性化と在宅勤務

リモートサイトオペレーションによる地方の活性化は、情報通信ネットワークに接続され、テレビ会議システムが組み込まれたマルチメディアパソコンにより実現する。一時間以上の時間をかけ、しかも痛勤電車を使ってオフィスにたどり着いて、創造的仕事ができるか、と尋ねられれば、できないと答えるのが正解だ。しかも、首都圏では平均的な年収では十分な広さのマンションも買えない時代になった。

むしろ、創造的開発には歴史的に文化がある地方の方が適している。本物の文化とは何かを知っている人は、本物の良さが見分けられるから、創造的な仕事ができる。文化のないただの田舎では開発技術者にストレスが溜まって仕事の効率が落ちる。地方の活性化とは、首都圏か

らの移転というよりは、その地方に住みたい人に機会を与えることだ。

地方でのリモートサイトオペレーションにおいて欠けているものは、人と情報へのアクセスに時間がかかることである。リアルタイムでのフェース・ツー・フェースのコミュニケーションが欠けると、相手がどう感じているかがわからなくなるから、精神が安定しなくなり、疑心暗鬼が起き、発想が全てネガティブになる。

昔、インテルで日本にデザインセンターを開設したときに、報告していた米国の副社長に言われたことがある。毎週四ページぐらいの、自分があたかも日本にいるように感じられるリポートを送ってくれ、である。これは大変な作業だった。十五年前の、ＩＢＭパソコンが開発される二年前の話であった。

まず、ＩＢＭのワープロであるディスプレイライターを購入し、きれいな図面が描けるように印字用ヘッドの空いているところに八つ位の直線などの特殊文字を追加してもらい、次に、インテルの中で評判が良く面白いリポートを書いている人にリポートを分けてもらった。準備は整い、随分と苦労はしたが、なんとか所期の目的は達成できた。ただ、電話とファクスしかない時代では、米国はあまりにも遠かった。ちょっと会って目を見て直接話せば通じるものが、電話ではなかなか理解しえないことが多かった。

情報の収集と伝達が間接的に行われたり、遅れたりするほど恐ろしいことはない。情報の収

集と伝達はリアルタイムで直接行われることが最良である。今、パソコンを使った電子メールが脚光を浴びているが、それは、十年以上前の文字ベースの古くさい陳腐化した技術である。マルチメディア時代の通信は、ウィンドウと同じように、グラフィカルなユーザーインタフェースが利用でき、かつ、利用できるメディアも、パソコンと同様に、テキスト（文字）だけではなく、グラフィックス（絵）、オーディオ（音声、音楽）、ビジュアル（写真、ビデオ）と豊富でなければならない。

一九九〇年代後半には、日本でも、米国の情報スーパーハイウエーのようなB—ISDN情報通信ネットワークが整備され、マルチメディア通信が実現する。テレビ会議システムが組み込まれたマルチメディアパソコンを介し、ウィンドウの環境下で、欲する情報を欲する時にアクセスでき、発信したい情報をいつでも発信でき、同じデータベースを見つつ、その場でデータを交換しつつ、フェース・ツー・フェースのコミュニケーションができ、地方でのリモートサイトオペレーションが可能となる。

在宅勤務の実現性はあまり高くないかもしれない。システム的にはリモートサイトオペレーションと同じであるから、在宅勤務は理論的には実現可能である。ただし、個人で会社には属さず、かつ、自宅に一部屋分のオフィスが確保できる場合だけである。会社に属している場合には、むしろ、職住近接を目的とした、小さな規模のオフィスを各通勤沿線上に配置するサテ

ライトオペレーションの方が実現性がはるかに高い。ニューメディアブームの時に、在宅勤務やサテライトオペレーションが成功しなかった理由の一つに電話料金の距離制があった。
マルチメディア時代の便利さは、多くの書類を持たずに、かつ、重くて大きなノート型パソコンを持たずに顧客訪問ができることである。もちろん、手渡してくる商品のパンフレットやプレゼンテーション資料は持っていかなくてはならない。低料金で定額制の情報通信ネットワークが使える時代になると、携帯用パソコンにはデータやソフトの格納用ディスクが不要となり、ペン入力もキーボード入力も可能な、ノート一冊の大きさと厚さで、軽量で、電話機能が付いて、コネクター類が一切ないモービル（Mobile）パソコンへと進化し、データやソフトの送受信は全て有線または無線通信で行われる。せいぜい、OSと必要最低限のソフトとデータの一時格納用に小さな固定式のシリコンディスクがあれば十分である。
プレゼンテーションではデータの取り出しにリアルタイム性が要求され、データの読み出しにアプリケーションソフトウェアをロードするのでは時間がかかるので、マッキントッシュで既に実現されているアプリケーションソフトウェアがなくてもデータが読めるような機能が使われる。さらに、既存のOSの他にゼネラル・マジック社のマジックキャップOSが採用され、エージェント（代理人）と呼ばれるプログラムが各種のデータベースを通信回線上で動き回り、必要とするデータをアーカイブ（保管）しているサービス会社から取り出すことが簡単にでき

るようになる。今回の阪神大震災においてアーカイブしていない個人や小企業におけるデータが全て消滅してしまったことは記憶に新しい。販売や配達や教育現場では、リアルタイムにデータの入力や表示出力が要求されるので、モービルパソコンが必須の道具となる。

創造性の教育と創造的開発による日本製造業の新生

第二次大戦後の学校教育しか知らない者からみれば、学校教育とは知識を教え込まされることが主だった。英語を高校卒業まで六年間やったが、何も面白くない。単に翻訳という技術を習っただけだった。しかも、文法の細かい間違いを指摘されたり、受験のための文法を勉強しても、何の役にも立たなかったというのが実感だ。大学は理学部に入ったことが幸いであった。恩師である教授が、工学部と経済学部は実務を教えるところであり、理学部と文学部は今すぐには役に立たない学問をするところである、理科系の会社であっても工学部出身者と理学部出身者とをバランスをとって採用することが望ましい、と教えてくれた。名言である。

創造的開発なり、生産であっても、創造的作業をするためには、現行の学校教育を変更しないかぎり不可能だろう。まして、米国との開発競争に勝つためには、学校教育や受験制度を早急に見直す必要がある。

近年、大学院大学が少しずつ設立されており、大学における研究が充実してくると予想される。大学を訪問すると、中には素晴らしい半導体装置と共に感心するほど良く考えられた教育

カリキュラムで運営している大学もあるが、大半は、設備も補助技術者も充実していないし、研究費も呆れるほど少ない。高度成長で、研究と開発は大学や国の研究機関から民間へ移り、民間での研究や開発の体制や力が充実したが、現在は、民間では、今まで蓄積してきたものを全て使い切ったような感じがする。

米国でマイクロプロセッサ、システム、ソフトウェアなどの分野における開発力が強いのは、優れた大学教育と職業意識の高い優秀な大学生がいるのも一つの要因だろう。今こそ、大学や国の研究機関を新たに活性化しないかぎりは、日本の開発力は向上しないだろう。また、大学教育だけを変えても、入学してくる学生の質や気質を変えなければ、学生は技術を習得するだけで卒業してしまう。

高度技術大量生産に必要な、人材確保のための知識ベースの教育は必要ではあるが、マイナス面が大きくなり過ぎた。高度技術大量生産という文明は、日本が作り上げた大傑作である。ただ、製造という文明の発展に力を入れすぎてしまって、創造的開発という文化に力を注いだ米国に苦労して築き上げた文明を利用され、大きな付加価値を持っていかれ、弊害の方が大きくなりすぎたのが今の日本の状態である。

今後の日本の取るべき進路は、高度技術大量生産という文明に創造的開発という文化を加味することである。開発をベースにした文化を創造するためには、会社においては人員という量

の確保ではなく、優秀な人材の確保と優遇するシステムと実力による入社システムの採用であり、国の研究機関の活性化であり、大学においては研究の充実と高校教育における勉強を尊重した受験システムの採用であり、高校においては受験勉強の撤廃と創造という新科目の導入、である。多感な年代の中学と高校時代において、科学であれ文学であれ、創造することの楽しさを味わわせてあげるのが、大人の役目ではないのか。

マルチメディアの将来

好きであれ嫌いであれ、販売であれ製造であれ開発であれ、これから必須の文明と文化はパソコンとマルチメディアとなる。最近、マルチメディアも以前のニューメディアの二の舞になるのではないかとか言われている。ニューメディアの中心は、一九八五年にNTTによる日本縦貫光ケーブル網を使ったINS（高度情報通信システム）構想であり、CATVであり、衛星放送であり、VAN（付加価値通信網）の解禁であった。

ニューメディアブームが去って残ったものは、電話料金の引き下げと採算の合わない衛星放送だけだった。全てが文明の構築であって、文化の創造は何一つなく、成功するはずはなかった。一方、米国では、衛星放送とCATVという文明を使ったCNN放送や、ネットワーク同士を接続してデータベース検索や電子メールなどのサービスが利用できるインターネットなどの文化が躍り出て成功した。

コンピュータネットワークであるインターネットは、英語しか使えないとか信頼性が低いとか言われているが、情報スーパーハイウエーという高度文明が利用できると、テキストだけではなく、グラフィックス、オーディオ、ビジュアルの全てのメディアを使って、ユーザー層は大学や研究機関から仕事の効率を求めているビジネスへ、そして日常の楽しみと便利さを求めている家庭へと広がる。

インターネットも、ユーザー側ソフトとして使いやすいMOSAIC（モザイク）を含んだ日本語が使えるサービスがある。今までの日本では情報の受信に重きを置いていたので、英語のメディアでは困るのでインターネットは使えないという人もいる。インターネットとは情報の発信に使うのだというように意識改革をしないかぎり正確には評価できない。

情報スーパーハイウエーであれ、B―ISDNであれ、マルチメディア時代の情報通信ネットワークを利用すると、低料金で定額制の通信網を使って、ビデオ・オン・デマンドのシステムが利用できる。私のところでもケーブルテレビが利用できるが、一番の難点は見たい番組の時に家にいなければならないことだ。

米国では少し失速しかかっていると言われるが、見たい番組、すなわち貴重なデータベースを見たい時間に見れることは非常に重要だ。本は本屋へ、映画は映画館かビデオショップへ行けばよいが、見たい番組はビデオで録るしかないし、録ることも管理することもめんどくさい

し、昔の番組は永久に見られない。ＮＨＫであれ、民放であれ、データベースとして見たい番組はいっぱいある。図書館にいっても、本があまり古くなると倉庫にしまわれることもあり、調べたい本を捜してもない場合がある。電子出版はマルチメディア時代には必須となり、文学書であり、科学書であれ、出版される本は著者の許諾の下にデジタル化され、情報通信ネットワークを介して、利用したい人に提供できれば、より豊富なデータベースとして、利用したいときに利用できる。

また、マルチメディアで教育という分野を含むデータベースが作り上げられると、図書館の使い方も変わってくる。図書館と学校が一緒になったマルチメディア教育も夢ではない。もちろん、趣味や教養に関連したマルチメディア成人学校や、マルチメディア大学も考えられるが、社会人を対象にしたマルチメディア社会人大学が、これからのマルチメディア文化を担うマルチメディア人を作り上げる教育制度の一つとなる。

会社に入った後に初めて何を勉強しなければならないかや、何を勉強したいかがわかるが、学校を卒業すると、自分で勉強するしか道はない。マルチメディアの便利さの一つは、勉強したいときに勉強できる環境を提供できることだろう。

医療も変わってくる。まず、患者のデータベースであるカルテもマルチメディア化される。患者の容体を文字だけでなく、患者の状態をビデオ化するだけで物凄い高い品質の情報が得ら

れる。顔なり皮膚なり、色という重要な情報がデータベースとしてビデオ入力されると、次の回の診療に当たって前回と簡単に比較でき、適切な治療ができる。遠隔地にあっても、情報通信ネットワークを介して、センサーが付いた測定器を使い患者の状態を調べつつ、ビデオで顔や患部を診察でき、処方箋も発行できる。通院時間と費用を考えると莫大な時間と金額を節約できる。

マルチメディアが成功するか否かは、マルチメディア向けのソフトウェアとデータベースの成功にかかっているが、パソコンを使うことによって創造性を発揮できる人口をいかに増やすかも重要な課題である。

があり、それをDRAMリフレッシュと言う。

レジスタ（記憶装置）

CPUの中の演算装置の中にあり、一般的にCPUの１語長と同じ長さを持ち，算術演算や論理演算に際して使われる特別な記憶である。データ情報だけでなくアドレス情報も格納する。汎用レジスタはLOAD（ロード＝読む）命令などによってメインメモリから読み出されたデータや、STORE（ストア＝書く）命令によってメインメモリに書き込むデータを保存（記憶）する。

命令の並列処理技術で、パイプラインの段階を細分化するスーパーパイプライン処理により高動作周波数で性能を上げる方法より高性能処理が可能。

セグメント（方式）

セグメントとは長いプログラムやデータを短い単位の系列に分割すること。プログラムはプログラミングを簡単に行うために、いくつかの分割サイズが可変のセグメントに分割される。

浮動小数点演算

技術計算では、2 進法で表現された仮数（固定小数点部データ）と指数の演算を行う。

ビット・バイト・ワード・クオッド

4 ビットをディジット、8 ビットをバイト、16 ビットをワード、32 ビットをダブルワード、64 ビットをクォッドワードと言う。

分岐命令

プログラムの流れを変える命令。

プリエンプティブ

マルチタスク OS で、複数のタスクを OS が強制的に時間で切り替えて実行し、あたかも同時処理を行っているかのように見せかける OS のことをプリエンプティブであるという。

プログラム記憶方式

コンピュータは、メインメモリに記憶しているプログラムの命令を順次読み出して解読、実行する。このような仕組みをプログラム記憶方式と言う。

ページング

分割サイズが固定の仮想記憶方式で、386 プロセッサでは仮想空間は 4 K バイト程度の一定の大きさのページに分割される。

マスク割り込み

プログラムが時間的に重要な作業をしているときには、外部の割り込みを禁止する必要がある。それをマスク可能割り込みと言う。マスク不可割り込み機能は、電源異常などのシステムの異常事態をマイクロプロセッサに強制的にマスク不可割り込みで知らせるための機能。

マルチプロセッサシステム

複数のプロセッサをつないで並列処理を行って処理速度を上げるシステム。

リフレッシュ制御

DRAM メモリは、メモリ内の半導体で作ったコンデンサにデータを電荷として格納しているため、時間が経つと消えてしまう。そこで一定時間にコンデンサの電荷を元に戻す必要

用語解説

CISC／RISC

RISC（＝Reduced Instruction Set Computer）は縮小命令セットコンピュータ。固定長命令で基本命令などを簡素化し、数を少なくして演算処理を上げたコンピュータ。CISC（＝Complex Instruction Set Computer）は可変長命令で複雑な命令をCPUが直接実行できる単純な命令に変換する。

アキュムレータ（累算器）

被演算数や演算結果を入れるレジスタのこと。アキュムレータ専用のレジスタを持つコンピュータと、汎用レジスタの任意のレジスタをアキュムレータとするコンピュータがある。

アドレス

記憶装置（メモリとレジスタ）の中のロケーションの位置の認識番号。

アドレス指定方式

命令実行時に、命令の中で処理対象データ（オペランド）のアドレスを指定する方式。

オペランド

命令の実行時、処理の対象となるデータをオペランドという。

仮想記憶方式

小さなメモリで大きなプログラムを動かすために、必要な部分をメインメモリに置き、残りを補助記憶装置に格納しておく方式。

キャッシュメモリ

高速バッファメモリともいう。高速読み書きが可能だが、小容量なのでCPUとメインメモリとの読み書き速度を見かけ上向上させるために使う。

システムバス

バスはマイクロプロセッサがメモリや入出力装置と命令やデータを送受信するための信号路のこと。

スタックポインタ

スタック領域へ退避されたデータのアドレスを保持するレジスタ。

スタックメモリ

スタックは棚のこと。スタックメモリは後で実行に必要となる情報を一時的に格納しておく場所である。スタックメモリに格納された情報は、最後に入れたものが最初に取り出される。

スーパースカラ

2つ以上の命令が同時に実行される

〈著者紹介〉
嶋　正利（しま・まさとし）
1943年静岡生まれ。67年東北大学理学部化学第二学科卒。ビジコン社に入社後渡米し、インテル社で世界初のマイクロプロセッサ4004を開発。72年にインテル社に入社し、8080とペリフェラルチップを開発。75年にザイログ社でZ80、Z8000を開発。80年、インテルジャパンのデザイン所長として帰国。86年に新しいマイクロプロセッサを開発するブイ・エム・テクノロジー社を設立し、現在副会長。92年筑波大学工学博士。
〔著書〕
『マイクロコンピュータの誕生：わが青春の4004』（1987年、岩波書店）

NIKKEI INFOTECH

次世代マイクロプロセッサ

―マルチメディア革命をもたらす驚異のチップ―

1995年2月24日　　1版1刷

著者　嶋　　正　利

発行者　岡　井　紀　道

発行所　日本経済新聞社
東京都千代田区大手町1-9-5　〒100-66
電話(03) 3270-0251　振替　00130-7-555

印刷／図書印刷　製本／積信堂
ISBN 4-532-40066-X